



TITLE:

空港コンクリート舗装版の温度応力に着目した疲労度設計手法の合理化に関する研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

尾関, 孝人

CITATION:

尾関, 孝人. 空港コンクリート舗装版の温度応力に着目した疲労度設計手法の合理化に関する研究. 京都大学, 2011, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2011-09-26

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k16389>

RIGHT:

空港コンクリート舗装版の温度応力に着目した
疲労度設計手法の合理化に関する研究

2011 年

尾関 孝人

目 次

1. 序論.....	1
1.1 はじめに	1
1.2 コンクリート舗装版に生じる温度応力.....	4
1.3 コンクリート舗装版の温度分布特性	7
1.4 3DFEM による温度応力解析	8
1.5 疲労度設計	9
1.6 本論文の構成	10
2. コンクリート舗装版に対するひずみ・温度計測.....	15
2.1 はじめに	15
2.2 環境要因によるコンクリート舗装版の挙動.....	16
2.3 ひずみ・温度計測概要および計測データ.....	19
2.3.1 コンクリート舗装版のひずみ・温度計測.....	19
2.3.2 コンクリートの配合.....	20
2.3.3 データ解析の要素試験結果.....	21
2.3.4 ひずみ・温度計測データ.....	22
2.4 ひずみ・温度計測結果に基づく温度応力.....	28
2.4.1 日温度変化により生じるコンクリート舗装版上下面の温度差.....	28
2.4.2 日温度変化により生じる拘束応力.....	31
2.4.3 日温度変化により生じる温度応力.....	36
2.5 おわりに	42
3. コンクリート舗装版の温度分布特性.....	44
3.1 はじめに	44
3.2 コントロールボリューム法	46
3.3 熱特性値	49
3.4 版内温度分布に対する版厚の影響	51
3.5 版内温度分布の二次曲線表現	54
3.6 おわりに	55
4. 3DFEM による温度応力解析	57
4.1 はじめに	57

4.2	解析プログラム	59
4.3	構造モデル	59
4.3.1	8 節点 6 面体要素	59
4.3.2	境界面要素	60
4.3.3	ダウエルバーモデル	64
4.3.4	ばね係数	69
4.3.5	温度応力	70
4.3.6	FEM への定式化	70
4.3.7	非線形解析法	72
4.4	3DFEM モデル	73
4.5	ひずみ・温度計測結果より算定された温度応力との比較	74
4.5.1	コンクリート舗装版の変形について	74
4.5.2	拘束ひずみ	76
4.5.3	温度応力	77
4.6	非線形温度分布の影響の検討	78
4.7	版内平面位置の影響の検討	81
4.8	温度応力に対する版厚の影響	85
4.9	既往の温度応力式との比較	87
4.10	おわりに	95
5.	疲労度設計手法の合理化の提案	97
5.1	はじめに	97
5.2	疲労度の算定方法	100
5.2.1	従来の疲労度算定手法	100
5.2.2	本研究における疲労度算定手法	102
5.3	温度応力頻度分布	104
5.3.1	温度応力頻度分布の算定方法	104
5.3.2	温度応力頻度分布に及ぼす温度応力算定手法の影響	105
5.3.3	温度応力頻度分布に対する版厚の影響	108
5.3.4	時間帯を考慮した温度応力頻度分布の算定	110
5.4	疲労度の算定	113
5.4.1	設計条件	113
5.4.2	航空機荷重応力の算定	116
5.4.3	温度応力頻度分布	123

5.4.4 疲労度算定結果－版厚毎の比較.....	124
5.4.5 疲労度算定結果－温度応力の算定手法毎の比較.....	126
5.5 今回提案手法による試設計	128
5.5.1 設計条件.....	128
5.5.2 温度分布および温度応力.....	129
5.5.3 温度応力頻度分布.....	131
5.5.4 疲労度算定結果.....	133
5.6 おわりに	134
6. 結論.....	137

1. 序論

1.1. はじめに

社会の成熟化に伴い、社会資本整備のための投資余力の減退が予想される中で、社会資本を選択して投資すること、既存のストックを有効に活用すること、そして必要となる社会資本に対するコストを縮減することが強く求められている。そのような流れの中で、莫大な費用を投資して建設される空港施設の設計においても、その設計・施工法について、従来行われてきたものを見直し、コスト縮減につながるものを考案する必要がある。さらに、近年、航空機の大型化および航空機交通量の多頻度化に伴い、舗装に与える影響も従来考慮されていたものとは異なることが考えられる。そのような背景から、初期投資の縮減に加えてその後の補修や更新などのライフサイクル全体を考慮した合理的な舗装設計法が求められている。

空港コンクリート舗装の設計において考慮される応力としては、航空機荷重により発生する荷重応力と、コンクリート版の温度変化や収縮等による自由な変形が版の自重や版と路盤との摩擦により拘束されることで発生する温度応力がある。我が国の空港コンクリート舗装は、従来「空港舗装構造設計要領、(財)港湾空港建設技術サービスセンター、平成 11 年 4 月」^[1]に基づき設計が行われていた。この要領は経験的設計手法が中心であり、コンクリートの設計曲げ強度を設計反復作用回数により定まる安全率で割り、荷重応力がその強度を上回らないように版厚を設定する手法であった。ここで、設計反復作用回数は設計供用期間内に想定される複数の機種の離着陸回数を設計対象機種の交通量として表した指標である。設計反復作用回数の算定は、複数車輪の脚荷重を舗装に及ぼす影響が等しくなるような単車輪荷重に換算した等価単車輪荷重(ESWL)を用いて行われる^[1]。一方で、荷重応力の算出については、Westergaard^[2]の中央部載荷公式を元にした影響図^[3]を福手^[4]が電算化したプログラムが用いられる。一方、米国連邦航空局(FAA)等の設計法^[5]では、Westergaard の縁部載荷公式を用いて算出した荷重応力を 25%低減した値を版厚の設計に用いている^[6]。また、温度応力については、米国のポルトランドセメント協会の研究^[7]において、最も影響の大きい交通荷重による応力に対して適切な安全率で設計すれば、荷重応力以外の応力に対しても十分安全な範囲であることが示されている。そこで、従来の我が国の空港コンクリート舗装設計では、表 1-1 に示すように、米国陸軍工兵隊の実験等^[8]を参考に定めた設計反復作用回数に応じた安全率でコンクリート設計基準曲げ強度を割り、荷重応力がその強度以下となる版厚を算出していた^[1]。

表 1-1 空港コンクリート舗装における安全率

設計反復作用回数	設計反復作用回数 区分	安全率
3,000 回	M	1.7
5,000～20,000 回	N	2.0
40,000 回	O	2.2

しかし、近年では上記に述べたような航空機の大型化や航空機交通量の増加に伴い、現行の設計法で考慮されていなかった大型航空機による荷重や多頻度の交通量を設計条件として考慮する必要が生じてきた。このようなことから、上記に述べた旧要領から、「空港舗装設計要領及び設計例、(財)港湾空港建設技術センター、平成 20 年 7 月」^[9]に改定が行われ、経験的設計手法から理論的設計手法が中心となるものへ移行した。この中では、コンクリート舗装版の理論的設計手法として、荷重応力と温度応力を各々個別に算出し、コンクリート疲労破壊曲線によりコンクリート舗装版の疲労度を算定し照査する疲労度設計手法により版厚設計が実施される。特に、従来の経験的設計手法においては、疲労および温度応力等の荷重応力以外の応力による影響を荷重応力の安全率に含めて考慮していたが、疲労度設計のような理論的設計手法を用いる場合には、コンクリート舗装版に作用する航空機荷重、およびコンクリート舗装版が曝される気象条件により生じる温度応力を考慮して、コンクリート舗装版に生じる応力を各々適切に算定する必要がある。また、疲労度設計においては、従来の経験的手法のような設計反復作用回数は用いず、離着陸する航空機の交通量を機種毎に整理し、設計交通量として直接計算に用いる。ここで、疲労度はマイナー則を用いて、下式のように算定される。(疲労度=(ある曲げ応力の発生回数)/(ある曲げ応力に対する許容繰返し回数))

$$DF(j,k) = \sum_i \sum_d \frac{f_i f_d N_{total}}{N_{allowable}(\sigma_L, \sigma_t)} \quad (\text{式 1-1})$$

ここに、

$DF(j,k)$: 位置(j,k)における疲労度

f_i : 航空機荷重が横軸位置 i 点に作用する相対頻度

f_d : コンクリート舗装版上下面温度差 $d^{\circ}\text{C}$ となる相対頻度

N_{total} : コンクリート舗装版に作用する航空機荷重の総回数 (全体交通量)

$N_{allowable}(\sigma_L, \sigma_t)$: 曲げ応力 $\sigma_b (= \sigma_L(i,j,k) + \sigma_t(d,j,k))$ での許容繰返し回数

σ_L : 脚載荷位置 i の場合の位置(j,k)における航空機荷重により生じる応力

σ_t : 上下面温度差 $d^{\circ}\text{C}$ のとき位置(j,k)での温度応力

疲労度の算定に関して、温度応力については、従来岩間の提案式^[10]が一般的に用いられてきた。この式は版厚 20～25cm のコンクリート舗装版に対する長期計測結果から導出された実験式であ

り、道路コンクリート舗装の設計において用いられている。しかし、版厚が異なる場合はコンクリート舗装版の温度分布および温度応力も大きく異なり、特に版厚の厚い空港コンクリート舗装では岩間の提案式で算定された温度応力よりも小さく評価できることが指摘されている^[11]。このように、岩間の提案式においては、コンクリート舗装版の温度分布および温度応力について、版厚の影響を考慮しておらず、版厚の厚い空港コンクリート舗装に対しては、過大に評価していると考えられる。これに対して、坪川は版厚 42cm のコンクリート舗装版に対する長期計測結果から、版厚の影響を考慮したコンクリート舗装版の温度応力算定式を提案している^[11]。しかし、このような長期計測結果に基づく研究はなされているものの、コンクリート舗装版の温度分布・温度応力に対する版厚が及ぼす影響や、それらの挙動について詳細に検討をした研究はあまり行われておらず、明確でない点も多いのが実状である。また、解析等による理論的なアプローチも殆ど行われていない。

また、(式 1-1)に示す版上下面温度差の発生頻度については、現行の指針^[12]では、実測値から設定することが望ましいとしながら、一例として版厚 15~30cm までの 6 パターンのコンクリート版に対して、「温度差の大きい地域」と「温度差の小さい地域」の 2 地域の発生頻度が設定されているのみである。このように、現行の指針に示されている版上下面温度差の発生頻度は、地域性や版厚が限られたものであり、汎用性がない。しかし、空港が位置する地域の気象条件および版厚により版上下面温度差の発生頻度は大きく異なり、その差異が温度応力、およびその温度応力を用いて算定される疲労度に及ぼす影響は大きい。

以下に上記で述べた空港コンクリート舗装の設計手法の概要および問題点を整理する。航空機の大型化・航空機交通量の多頻度化に伴い、空港コンクリート舗装設計手法は、経験的設計手法から理論的設計手法に移行している。理論的設計手法として、コンクリート舗装の疲労によるひび割れ破壊に着目し、疲労度解析による設計手法が用いられているが、その中では航空機荷重応力および温度応力の算定が必要となる。特に、温度応力に関しては、従来の提案式はある版厚のコンクリート舗装に対する計測結果に基づいた実験式であり、様々な版厚へ適用するための汎用性に欠ける。同様に版上下面温度差の発生頻度についても、現行の指針に示されているものは、地域性・版厚が限られたものであり、汎用性があるとは言い難い。

このようなことから、コンクリート舗装版の温度分布・温度応力の挙動に対する詳細な検討を行い、版厚・気象条件を考慮した汎用的な温度分布・温度応力の評価手法を確立することが、合理的な空港コンクリート舗装設計を行ううえで必要となると考えられる。以上の背景から、本研究では、汎用的な解析手法として温度分布予測モデル・3 次元の構造解析モデルを組み合わせた理論的解析手法による温度分布・温度応力の評価手法の確立を試みた。さらに、これらのモデルに基づいた汎用的な空港コンクリート舗装の疲労度設計手法の一提案を行うことを目的とした。

まず、ひずみ・温度の長期計測結果を基に、コンクリート舗装版に生じる温度応力の算出を行

い、その挙動を確認する。また、現行の温度応力に対する各提案式と比較することで、現状の手法の問題点を整理する。次に、コンクリート舗装版に対して、温度分布予測モデルとして、熱伝導解析を行い、理論的に温度分布を算定する。さらに、その温度分布を用いて、3次元の構造解析モデルとして 3DFEM による温度応力解析を行い、温度応力を算定する。それらの結果より、版厚・気象条件が温度分布・温度応力に及ぼす影響について検証する。また、現行の温度応力評価手法と比較を行い、熱伝導解析・3DFEM といった今回採用した理論的評価手法の有用性を確認する。最後に、その温度応力を用いたコンクリート舗装版の疲労度設計を行い疲労度を算定し、現状の手法との比較および試設計を行う。それらの検討結果より、空港コンクリート舗装版の温度応力に着目した理論的かつ合理的な疲労度設計手法の一提案を試みる。

1.2. コンクリート舗装版に生じる温度応力

上記で述べたように、従来の経験的手法のように温度応力の影響を荷重応力の安全率の中を含める手法とは異なり、疲労度設計においてはコンクリート舗装版の温度応力を求めることが必要となる。版上下面温度差が最大となるときの温度応力は航空機荷重応力と同等程度の値を示すため、コンクリート舗装版の設計において、温度応力が疲労度へ及ぼす影響は大きい。

コンクリート舗装版に生じる温度応力とは、図 1-1 に示すように、温度変化や収縮等による版の自由な変形が自重や路盤との摩擦により拘束されることにより生じる応力である。版の上面温度が下面よりも大きい場合、コンクリート舗装版は上面方向に反ろうとするが、自重によりその変形が拘束されることにより、版上面に圧縮力、版下面に引張力が生じることになる。一方、版の下面温度が上面よりも大きい場合は、反対に、コンクリート舗装版の下面方向に反ろうとするが、路盤との摩擦によりその変形が拘束され、版下面に圧縮力、版上面に引張力が生じることになる。

前述したように、従来はコンクリート舗装版に生じる温度応力については、岩間の提案式^[10]が一般的に用いられてきた。岩間の提案式は、厚さ 20cm と 25cm のコンクリート舗装版に対する長期計測結果から導出されたものである。この長期計測から推定された版底面の日最大温度応力は、曲げ拘束応力の概ね 0.7 倍程度となることが確認されている。これは、図 1-2 に示すように、版底面の曲げ拘束応力が引張り最大となるときに、版内温度分布の非線形性により生じる内部拘束応力は圧縮となるためである。そこで、版の深さ方向の温度変化が直線であること、すなわち内部拘束応力が 0 であることを仮定して求めた Westagaard の曲げ拘束応力式^[13]に対して、岩間の提案式は、このような曲げ拘束応力に対する内部拘束応力による低減の影響を考慮し 0.7 倍した値を温度応力としている。これらから、コンクリート舗装版の算定式として、下式が一般的に用いられている。ここに、 C_w ：そり拘束度、 α ：コンクリートの熱膨張係数、 θ' ：コンクリート版上下面の温度差である。

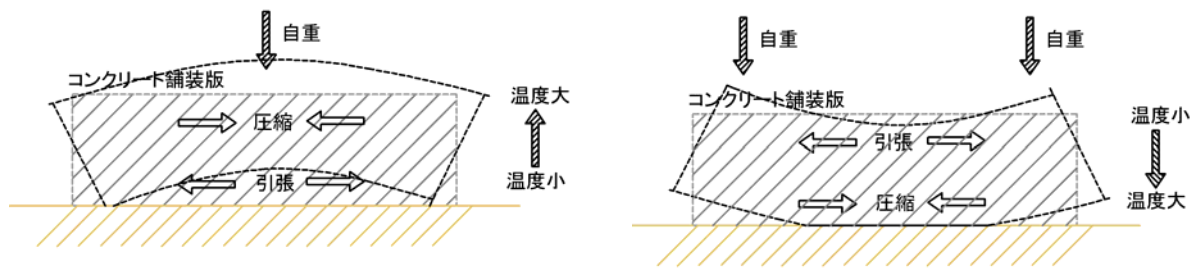


図 1-1 コンクリート舗装版の変形模式図

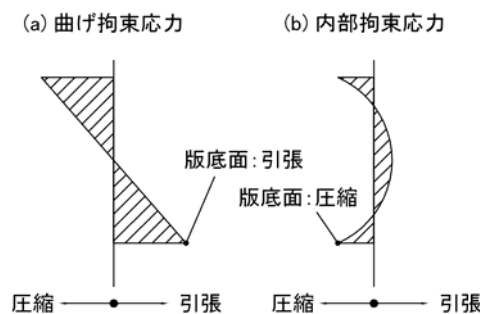


図 1-2 コンクリート舗装版の曲げ拘束応力と内部拘束応力

$$\text{コンクリート版中央部: } \sigma_{ie} = 0.7 \cdot \frac{\alpha \cdot E_c \cdot \theta'}{2(1-\nu)} \quad (\text{式 1-2})$$

$$\text{コンクリート版縁部: } \sigma_{ie} = 0.35 \cdot C_w \cdot \alpha \cdot E_c \cdot \theta' \quad (\text{式 1-3})$$

このような曲げ拘束応力が内部拘束応力により低減される事象に関しては、岩間のみならず、海外においても多くの研究者が指摘している^{[14][15][16][17][18]}。しかしながら、版厚の厚い空港コンクリート舗装版では、版厚方向の温度分布の非線形性は、岩間の提案式が導出された版厚 20～25cm のコンクリート舗装版よりも強くなる。したがって、その温度分布の非線形性により生じる内部拘束応力は、岩間の提案式で想定していたものよりも大きくなるため、温度応力は岩間の提案式で算出された温度応力よりも小さくなると考えられる。

そこで、坪川らは、版厚 42cm の空港コンクリート舗装版に対する長期計測結果を基に、版厚を考慮した版中央部における温度応力の実用的な式を導出している^[19]。この版厚の影響を考慮した提案式は、長期計測結果から推定された日最大温度応力、および有限要素法による熱収支解析から、曲げ拘束度のある値に仮定し推定されたものである。岩間の提案式では曲げ拘束応力に対する内部拘束応力による低減の影響として 0.7 倍した値を温度応力としていたが、坪川の提案式では、 $(-0.772h+0.854)$ 倍 (h : 版厚(m)) した値を温度応力としている。

このようにコンクリート舗装版の温度応力に対してその定量的な評価手法は様々に提案されている。しかし、岩間の提案式・坪川の提案式は、ある版厚のコンクリート舗装版に対する計測結果に基づいた実験式であり、様々な版厚・気象条件に対して、温度応力を適切に評価できているかは不明であり、以下の問題点が挙げられる。

問題点①：

両式とも版上下面温度差をパラメータとした式であり、版厚の影響を考慮しても版上下面温度差が同一であるならば、温度応力は同一となる。しかし、実際には気象条件等のコンクリート舗装版の曝される状況により、図 1-3 に示すように版上下面温度差が同一であっても、コンクリート舗装版内温度分布は異なる状況が生じうる。その場合、内部拘束応力も異なるため、温度応力にも差異が生じることとなる。温度応力の算定において、版上下面温度差をパラメータとするかぎりには、上記のような版内温度分布の差異により生じる温度応力の挙動を評価することはできない。

問題点②：

両式とも長期計測結果から、日最大温度応力のみに着目して導出された実験式である。日最大温度応力発生時刻の温度分布特性とそれ以外の時刻での温度分布特性は異なる。つまり、温度分布の非線形性により生じる内部拘束応力の曲げ拘束応力に対する低減率（岩間の提案式：0.7 倍，坪川の提案式： $(-0.772h+0.854)$ 倍）も、日最大温度応力発生時とそれ以外の時刻では異なると考えられる。

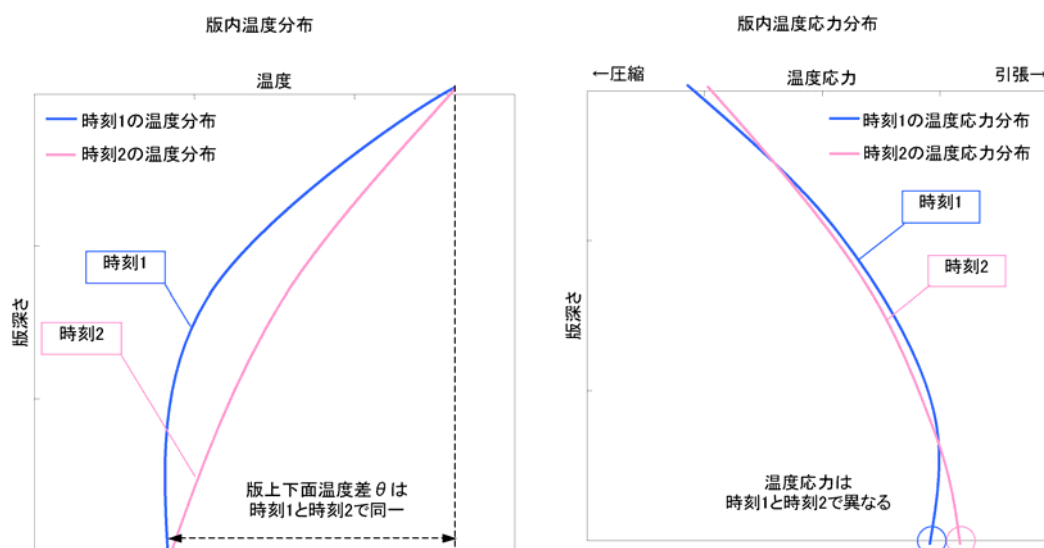


図 1-3 温度分布と温度応力の関係の一例

問題点③：

岩間の提案式においては、航空機荷重応力は版中央部および版縁部で大きい値を示すため、温度応力についても同様に版中央部および版縁部に着目して提案している。このように、版中央部および版縁部の温度応力といった大まかな区別はなされているものの、実際には版のどの部分でどの程度の温度応力が生じるのか明確でない。また、坪川の提案式は、版中央部の温度応力に対してのものであり、版縁部については明確化されていない。

問題点④：

両式ともある版厚のコンクリート舗装版に対する実験式であるため、構造的な拘束に及ぼす版厚・路盤支持・版の大きさの影響を考慮できない。

従来提案されている温度応力算定手法についての上記のような問題点を考慮し、版厚・気象条件を考慮したコンクリート舗装版の温度応力の挙動をより詳細に検証すること、および温度応力の適切な評価手法の確立が、合理的な舗装設計を行う上で必要である。そのためには、温度応力に対する理論的なアプローチが有効であると考えられる。

1.3. コンクリート舗装版の温度分布特性

コンクリート舗装版内の温度応力は、前述したように版上下面温度差だけでは温度応力の適切な評価はできず、版内温度分布に依存するため、その温度分布特性の把握が非常に重要となる。しかし、空港コンクリート舗装版のような厚い舗装版の温度分布特性に着目した調査もしくは研究は殆ど行われておらず、実態も明確ではない。特に、温度分布の非線形性が温度応力に及ぼす影響は大きく、その適切な評価が求められる。

また、舗装温度は、舗装が曝される気象条件の変化の影響を受け、日々変化するのみでなく、年間を通して大きく変動する。したがって、コンクリート舗装版が位置する場所での気象条件を考慮して、舗装温度を精度良く推測することが重要となる。

舗装温度に関して、気象に関連する因子は全天日射量、大気放射量、温度、相対湿度、風速があり、舗装に関連する因子としてはアルベド、射出率、熱容量、熱伝導率などが挙げられる^[20]。その他舗装表面において、舗装温度に影響する因子としては顕熱モデル、赤外放射モデル、潜熱モデルがある。既往の研究において、舗装温度を予測するための数値モデルの提案は数多くなされている。差分法・有限要素法を用いることも可能であるが、その中でもコントロールボリューム法^{[21][22]}による熱伝導解析は、アルゴリズムが簡単で境界条件に柔軟に対応でき、解析精度も良い。この方法は、着目している節点と隣接する節点の中央で切断した有限な厚さの層に流入・流出する熱エネルギーの収支が釣り合うという条件から支配方程式を誘導している^[23]。この方法によるアスファルト舗装温度についての予測はその適用性が確認されており^[24]、コンクリート舗装に

についてもその適用性を確認する必要がある。

1.4. 3DFEMによる温度応力解析

コンクリート舗装版は、比較的剛性の高いコンクリート版によって交通荷重を分散させて路盤以下に伝達する。このような構造的特質を考慮した構造解析を行うために、弾性路盤上の平板モデルが用いられてきた。このモデルにおいては、コンクリート版は弾性平板とされ、路盤以下はこの平板を支える機能のみがモデル化されている。代表的なモデルが Westergaard によって開発された Winkler 上の弾性平板モデル^[25]である。このモデルは扱いやすく、長い間コンクリート舗装版の標準モデルとして設計等に利用されてきた^{[26][27]}。しかしながら、この平板モデルには、路盤以下の構造を考慮できないこと、路盤の変形や応力に関する情報を与えないことなどの限界ある。特に、路盤の支持機能だけでなく、路盤自体の耐久性を問題にする場合には、路盤内の変形、応力解析が重要になってくる^[28]。路盤の取扱いについては平板モデルを拡張したいくつかのモデルが提案されているものの^[29]、路盤を平板要素に置き換えるなどの単純化が行われており、必ずしも路盤の変形性状を正確に表現したものとはいえない^[30]。

一方で、近年のパソコンの進歩に伴い、大規模な数値解析が比較的簡単に行えるようになっていく。このような中で、海外においても舗装設計における 3 次元有限要素法(3DFEM)による数値解析の汎用性・有用性・将来性が強く提言されており^{[31][32][33]}、今後この種のツールが標準的なものとなる可能性は大きいと考えられる。そこで、図 1-4 に示すように、舗装の構造解析に特化した 3DFEM プログラムパッケージが、西澤らによって開発されている(Pave3D)^[30]。このプログラムは、コンクリート舗装版、路盤、路床を 8 節点直方体ソリッド要素に分割し、目地や路盤とコンクリート舗装版の境界面は新たに開発した汎用境界面要素によってモデル化しており、航空機荷重が作用した場合のコンクリート舗装版に発生する荷重応力のみならず、温度応力についても算定できるプログラムとなっている。

このプログラムを用いて温度応力を算定する場合、版内温度分布を入力し、任意の位置における温度応力を算定する。したがって、1.2 に示した現状の提案式の問題点①に対して、版内温度分布を考慮した温度応力を適切に求めることが可能となる。また、現状の問題点②に対しては、各時刻の版内温度分布を入力することで、日最大温度応力発生時刻のみではなく、各時刻の温度分布を適切に考慮して温度応力を算定することができる。さらに、版平面内の任意の位置での温度応力を算定することができるため、問題点③に示したような現状の提案式では版中央部・版縁部といった大まかな区分しかないのに対し、版平面内のあらゆる位置での温度応力を適切に求めることが可能となる。問題点④に対しては、3DFEM において実際のコンクリート舗装版の版厚・形状、および下層路盤までモデル化できるため、より汎用性をもった適切な温度応力の評価を行うことができる。

つまり、従来は実験から導出された実験式のみしかなかったものに対して、3DFEM による温度

応力解析といった理論的なアプローチを行うことで、従来考慮できていなかった事象に対しても評価できるようになり、温度応力の挙動を詳細に検証することが可能となる。

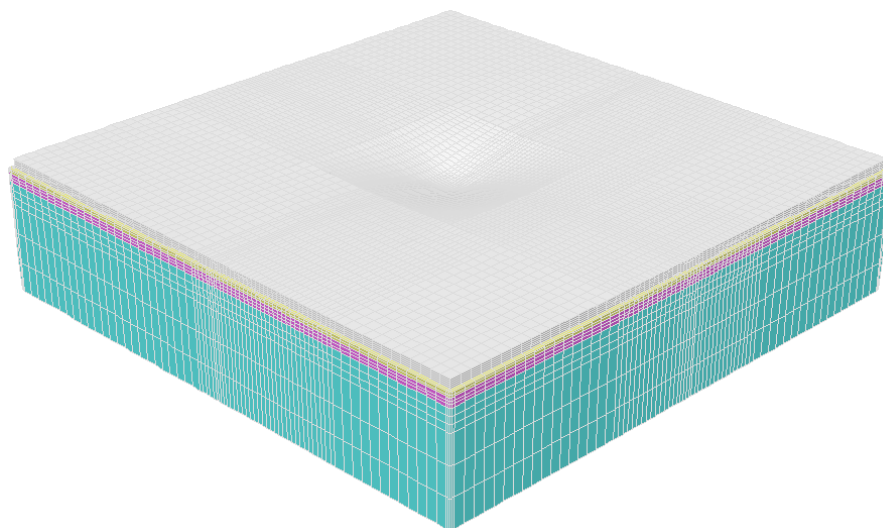


図 1-4 3DFEM モデルの一例

1.5. 疲労度設計

空港コンクリート舗装版の設計基準として従来用いられてきた「空港舗装構造設計要領，(財)港湾空港建設技術サービスセンター，平成 11 年 4 月」^[1]では，設計年数 10 年を想定し，設計年数内は航空機需要に大きな変動はないとして空港コンクリート舗装版を従来は設計されてきた。しかしながら，近年の目まぐるしい航空需要の増大により，「空港舗装設計要領及び設計例，(財)港湾空港建設技術センター，平成 20 年 7 月」^[9]に示すような理論的設計手法である疲労度設計法により，10 年以上の設計年数を想定して設計する事例が始まっている。

前述したように，疲労度設計法とは，荷重応力と温度応力を個別に算出し，コンクリート疲労破壊曲線によりコンクリート舗装版の疲労度を照査して版厚を設定する手法であるが，従来は温度応力として岩間の提案式により算定したものを用いていた。しかし，前述したように岩間の提案式による温度応力は過大評価しており，3DFEM のような温度応力の理論的算定手法を用いて温度応力を適切に評価することで，より合理的な舗装設計を行うことができると考えられる。

また，疲労度設計においては，ある値をもった温度応力がどの程度の頻度(回数)で生じるか，つまり温度応力の発生頻度を算定する必要がある。従来の手法では，版上下面温度差の発生頻度を用いて，岩間の提案式により温度応力の発生頻度を算定し，(式 1-1)に示すように疲労度を算定していた。その版上下面温度差発生頻度については，現行の指針^[12]では，実測値から設定することが望ましいとしながら，一例としてコンクリート舗装版上下面温度差の発生頻度を示している。しかし，版厚 15～30cm の 6 パターンのコンクリート版までのものしかなく，空港コンクリート舗装のような版厚が厚い場合に同様の発生頻度とはならない恐れがある。さらに，この中では，

コンクリート舗装版が曝される気象条件としては、温度差が小さいところ・大きいところといった区分しかないため、空港が位置する場所によっては、現行の指針における発生頻度では適用できない可能性もある。つまり、従来の手法では、対象とするコンクリート舗装版の版厚および気象条件に適した版上下面温度差発生頻度、およびそれから求まる温度応力の発生頻度を適切に評価できない恐れがある。その差異が温度応力、およびその温度応力を用いて算定される疲労度に及ぼす影響は大きいことは既往の研究においても示されている^[34]。また、版上下面温度差に対する解析的な研究^{[35][36]}も行われているものの、いずれもある特定の版厚に対するものであり、様々な版厚に対して行われたものではない。

上記に対して、1.3・1.4 で述べたような熱伝導解析・3DFEM を行えば、対象とするコンクリート舗装版の版厚および気象条件を考慮した版内温度分布・温度応力を算定することができる。さらに、温度応力を岩間の提案式・坪川の提案式のように版上下面温度差から算出するのではなく、3DFEM を用いて算定するため、直接温度応力の発生頻度を求めることができる。したがって、(式 1-1)に対して、適切な温度応力の発生頻度を考慮した下式に示すような疲労度の算定が可能となり、コンクリート舗装設計の合理化につながると考えられる。

$$DF(j,k) = \sum_i \sum_d \frac{f_i f_{\sigma_i} N_{total}}{N_{allowable}(\sigma_L, \sigma_i)} \quad (\text{式 1-4})$$

ここに、

f_{σ_i} : コンクリート舗装版に生じる温度応力が σ_i となる相対頻度

1.6. 本論文の構成

本論文の構成を、以下に示す。

2 章においては、実大のコンクリート舗装版に対して実施した長期計測における温度・ひずみデータ計測結果について述べる。また、その温度・ひずみデータを基に算定された、コンクリート舗装版に生じる温度応力についての検討結果、それらと現状の提案式との比較を実施し、現状の提案式の問題点の抽出・確認を行う。

3 章においては、コントロールボリューム法による熱伝導解析を行い、コンクリート舗装版内の温度分布を理論的に求める。その結果と 2 章に記述した計測温度データとを比較し、熱伝導解析の妥当性の確認を行う。また、温度分布算定結果から、コンクリート舗装版内の温度分布特性について検討する。

4 章においては、3 章において算定された熱伝導解析によるコンクリート舗装版の温度分布を用いて、3DFEM による温度応力の解析を行い、コンクリート舗装版の温度応力を理論的に算定する。その結果と 2 章に記述した計測温度・ひずみデータから算定された拘束ひずみ・温度応力と比較することで、3DFEM の妥当性の検証を行う。また、3DFEM による温度応力算定結果から、温度

応力に対する非線形温度分布の影響・版内平面位置の影響・版厚の影響について検討し、温度応力の挙動について整理を行う。さらに、現状の提案式と比較することで、現状の提案式の問題点に対して、3DFEM による温度応力解析が有用であることを確認する。

5 章においては 4 章において 3DFEM により算定されたコンクリート舗装版に生じる温度応力を用いて疲労度を算定する。まず、3DFEM により算定された温度応力を用いて疲労度を求めることができるように、温度応力頻度分布の整理、およびそれらを用いた疲労度設計手法の拡張を行う。また、航空機荷重応力についても 3DFEM により算定する。それらから空港コンクリート舗装版に生じる疲労度を算定し、疲労度に対して版厚が及ぼす影響、版内平面位置が及ぼす影響を検証する。さらに、現状の提案式により求められらた温度応力を用いた場合の疲労度について比較検討を行い、今回提案した疲労度設計手法の合理化の確認を行う。加えて、今回提案した疲労度設計手法により、気象条件の異なる国内の 2 地点における空港コンクリート舗装版の試設計を行い、その有用性の確認も行う。

最後に、6 章において、本研究の知見を整理するとともに、本研究で残された課題をまとめる。本研究の概要をまとめた検討フロー図を図 1-5 に示す。

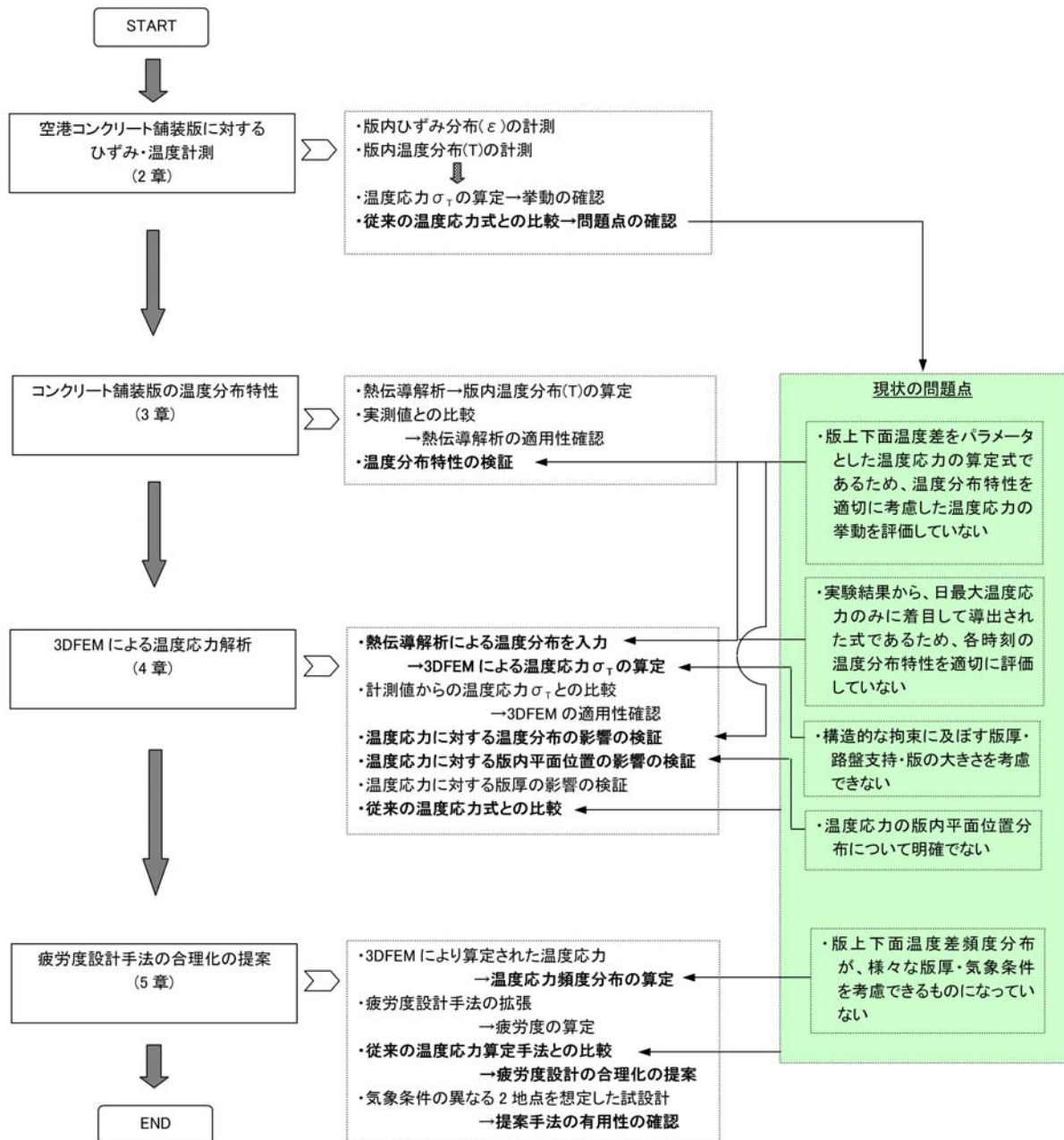


図 1-5 本研究の概要

参考文献

- [1] (財) 港湾空港建設技術サービスセンター：空港舗装構造設計要領，平成 11 年 4 月
- [2] Westergaard, H.M. : New Formulas for Stress in Concrete Pavements of Airfields, Transactions of ASCE, Vol.113, pp.425-444, 1998
- [3] Picket, G and G K. Ray : Influence Charts for Concrete Pavements, Transactions of ASCE, Vol.116, pp.49-73, 1951
- [4] 福手勤：空港コンクリート舗装厚設計への電算プログラムの応用，港湾技研資料，No.262, 1977
- [5] Federal Aviation Administration : Airport Pavement Design and Evaluation , AC, No.1500-6C, pp159, 1978
- [6] 福手勤他：コンクリート舗装の目地部における荷重伝達機能，港湾技術研究所報告，Vol.21, No.2, 1982
- [7] Portland Cement Association : Design of Concrete Airport Pavements, pp61, 1973
- [8] U.S.Army : Rigid Airfield Pavement, AirForce, TM5-824-3, pp.84, 1958
- [9] (財) 港湾空港建設技術サービスセンター：空港舗装設計要領及び設計例，平成 20 年 7 月
- [10] 岩間滋：コンクリート舗装の構造設計に関する実験的研究，土木学会論文集，No.111, pp.16-46, 1964
- [11] 坪川将丈，水上純一，江崎徹，八谷好高：空港コンクリート舗装の温度応力に関する研究，国土技術政策総合研究所資料，No.341, 2006
- [12] 社団法人 日本道路協会：舗装設計便覧，pp172, 2006
- [13] Westergaard, H.M. : Analysis of Stresses in Concrete Roads Caused by Variation of Temperature, Proceedings of the annual meeting, Highway Research Board, pp.201-215, 1926
- [14] Choubane, B. and Tia, M. : Analysis and Verification of Thermal-Gradient Effects on Concrete Pavement, Journal of Transportation Engineering, ASCE, Vol.121, No.1, 1995
- [15] Ioannides, A.M., and Kazanovich, L. : Nonlinear Temperature Effects on Multilayered Concrete Pavements, Journal of Transportation Engineering, ASCE, Vol.124, No.2, 1998
- [16] Mohamed, A.R. and Hansen, W. : Effects of Nonlinear Temperature Gradient on Curling Stress in Concrete Pavements, Transportation Research Record, No.1568, pp.67-71, 1997
- [17] Harik, I.E., Jianping, P., Southgate, H. and Allen, D. : Temperature Effects on Rigid Pavements, Journal of Transportation Engineering, ASCE, Vol.120, No.1, 1994
- [18] William, G.W., and Shoukry, S.M : 3D Finite Element Analysis of Temperature-Induced Stresses in Dowel Joint Concrete Pavements, The International Journal of Geomechanics, Vol.1, No.3, pp.291-307, 2001
- [19] 坪川将丈，水上純一，八谷好高，亀田昭一：日温度変化による空港コンクリート舗装の温度応力に関する研究，土木学会舗装工学論文集，第 12 巻，pp157-164, 2007

- [20]近藤純正：地表面に近い大気の科学-理解と応用-, 東京大学出版会
- [21]スハス V.パタンカー, 水谷幸夫, 香月正司：コンピュータによる熱移動の流れの数値解析, 1995
- [22]Incropera, F.P. and DeWitt, D.P. : Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 3rd edition, Wiley, 1990
- [23]青木大介, 吉中保, 藤波潔, 井上武美, 松井邦人：舗装の熱パラメータ推定に関する考察, 土木学会舗装工学論文集, 第 10 巻, pp.225-231, 2005
- [24]福田裕子, 吉中保, 松井邦人：数値シミュレーションに基づく密粒舗装および遮熱性舗装の表面温度予測システムの構築, 舗装, Vol. 43, No.4, pp.3-8, 2008
- [25]Westergaard, H.M. : Computation of Stresses in Concrete Roads, Proc. of HRB, Vol.5, pp.90-112, 1925
- [26]日本道路協会：セメントコンクリート舗装要綱, 丸善, 1981
- [27]土木学会：コンクリート標準示方書 舗装編, 1995
- [28]竹内康：路盤の支持力変化を考慮したコンクリート舗装設計法に関する研究, 長岡技術大学博士論文, 2000
- [29]西澤辰男, 福手勤, 国分修一：弾性平板 FEM に基づくコンポジット系舗装の解析法に関する研究, 土木学会論文集, 第 613 号, V-42, pp.237-247, 1999
- [30]西澤辰男：3 次元 FEM に基づいたコンクリート舗装構造解析パッケージの開発, 土木学会舗装工学論文集, 第 5 巻, pp.112-121, 2000
- [31]United States General Accounting Office : Transportation Infrastructure, Highway Pavement Design Guide is Outdated, Report to the Secretary of Transportation, GAORCED-98-9, 1997
- [32]Proc. Of National Conference on 3Dimensional Finite Element Method for Pavement Design, Charleston, West Virginia, 1998
- [33]西澤辰男, 笠原篤：舗装の構造解析および設計に対する 3 次元有限要素モデルに関するシンポジウム, 舗装, Vol.34, No.4, pp.28-30, 1999
- [34]高橋真一, 坪川将丈, 水上純一, 斎藤泰：空港舗装における理論的設計法パラメータの感度分析, 国土技術政策総合研究所資料, No.633, 2011
- [35]竹内康, 小梁川雅, 松井邦人：気象観測データを用いたコンクリート舗装版上下面温度差の試算, 土木学会第 60 回年次学術講演会, 5-104, pp.207-208, 平成 17 年 9 月
- [36]坪川将丈, 水上純一, 斎藤泰：空港コンクリート舗装の版上下面温度差頻度分布に関する考察, 土木学会第 65 回年次学術講演会, V-036, pp.71-72, 平成 22 年 9 月

2. コンクリート舗装版に対するひずみ・温度計測

2.1. はじめに

空港コンクリート舗装版の構造設計においては、航空機荷重により発生する荷重応力と、コンクリート版の温度変化による変形が版の自重及び路盤との摩擦により生じる温度応力を考慮する必要がある。版の上面温度が下面よりも大きい場合、コンクリート舗装版は上面方向に反ろうとするが、自重によりその変形が拘束されることにより、版上面に圧縮力、版下面に引張力が生じることになる。一方、版の下面温度が上面よりも大きい場合は、反対に、コンクリート舗装版の下面方向に反ろうとするが、路盤との摩擦によりその変形が拘束され、版下面に圧縮力、版上面に引張力が生じることになる。

従来、コンクリート舗装版に生じる温度応力については、岩間の提案式^[1]が一般的に用いられてきた。岩間の提案式は、厚さ 20cm と 25cm のコンクリート舗装版に対する長期計測結果から導出されたものである。この長期計測結果において、版底面の日最大温度応力は、曲げ拘束応力の概ね 0.7 倍程度となることが確認されている。これは、版底面の曲げ拘束応力が引張最大となる時に、版内温度分布の非線形性により生じる内部拘束応力が圧縮となるためである。そこで岩間の提案式は、Westergaard の曲げ拘束応力式^[2]に対して、0.7 倍した値を温度応力として提案している。しかしながら、版厚の厚い空港コンクリート舗装版では、版厚方向の温度分布の非線形性は、岩間の提案式が導出された版厚 20～25cm のコンクリート舗装版よりも強くなる。したがって、その温度分布の非線形性により生じる内部拘束応力は、岩間の提案式で想定していたものよりも大きくなるため、温度応力は岩間の提案式で算出された温度応力よりも小さくなると考えられる。

このように、版厚の厚い空港コンクリート舗装の場合は、温度応力は従来想定していたものとは異なる挙動を示す。したがって、合理的な空港コンクリート舗装版の構造設計を行う上で、舗装版の温度応力についてその挙動がどのようなものか検証し、適切な温度応力評価手法を確立する必要がある。

適切な温度応力評価手法を確立する前段階として、まず本章では、実際にコンクリート舗装版に生じる温度応力について検証する。厚さ 46cm の実大規模のコンクリート舗装版に対して、1 年間に渡り実施したひずみ・温度計測データから算定された温度応力についてその挙動を整理する。また、その温度応力と現状の提案式から算定された温度応力を比較することにより、現状の提案式の問題点を確認・抽出することを目的とした。

本章の概要をまとめた検討フロー図を図 2-1 に示す。

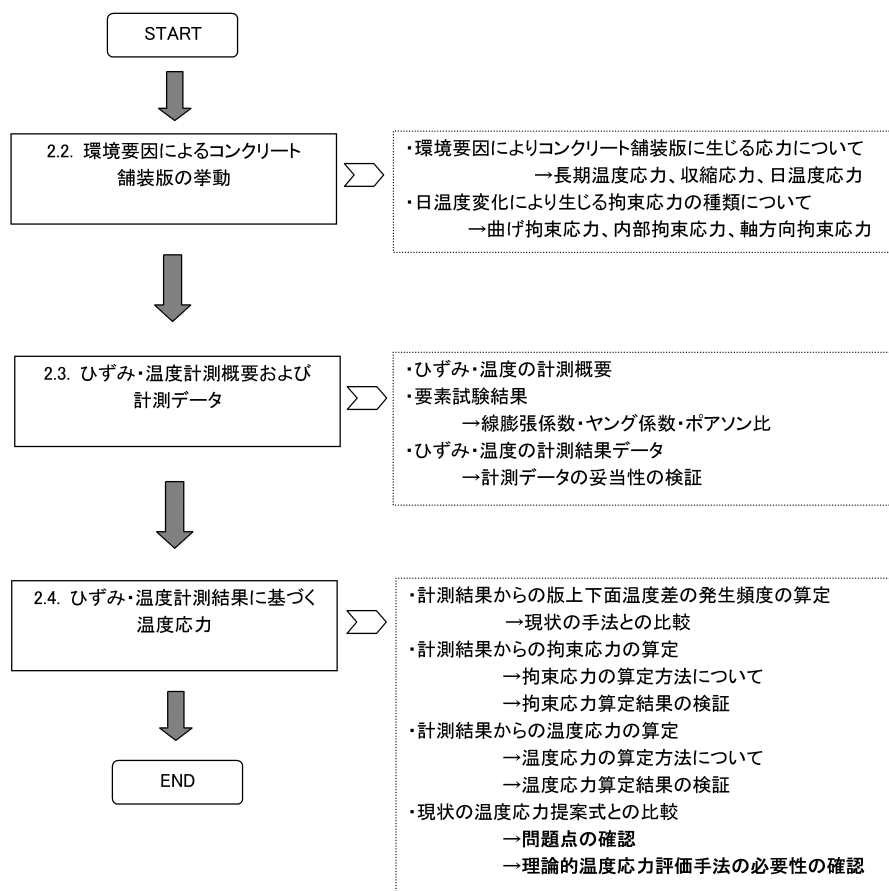


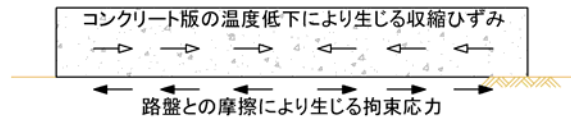
図 2-1 2 章の概要

2.2. 環境要因によるコンクリート舗装版の挙動

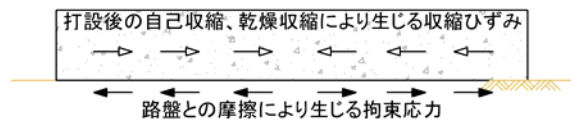
コンクリート舗装版は日照，風，降雨といった自然環境の作用を受けるため，乾燥収縮や温度変化に伴う体積変化が生ずることになる．ところが，コンクリート舗装版自体の重量や路盤との間の摩擦力等が原因でそれらの体積変化が拘束されて，コンクリート舗装版には拘束応力が発生する．環境作用によりコンクリート舗装版に発生する拘束応力には，図 2-2 に示すように，主として以下の 3 つが考えられる．

- ① 夏から冬にかけての長期間の温度降下により生じる拘束応力（以下，長期温度応力とよぶ）；
夏から冬にかけてのコンクリート舗装版の温度降下による収縮ひずみが路盤との摩擦により拘束されることにより生じる．
- ② コンクリート打設後の自己収縮，乾燥収縮により生じる拘束応力（以下，収縮応力とよぶ）；
打設後の自己収縮，乾燥収縮により生じるひずみが，路盤との摩擦により拘束されることにより生じる

①長期温度応力



②収縮応力



③日温度応力

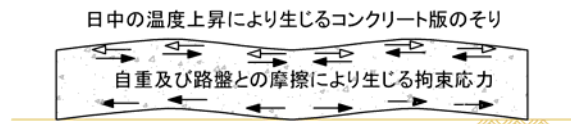


図 2-2 コンクリート版に発生する拘束応力

③1 日の温度変化によって生じる拘束応力（以下、日温度応力とよぶ）；

日中の温度上昇により生じるコンクリート舗装版の反り変形を自重および路盤との摩擦で拘束されることにより生じる。

上記のうち、長期温度応力及び収縮応力は日温度応力と比較して極めて小さく、日温度応力の影響が支配的となる。このことから、現行の設計法では長期温度応力と収縮応力の影響については考慮していない。また、前述したように従来のコンクリート舗装版の設計において用いられている日温度応力をモデル化した温度応力式は、岩間による厚さ 20cm～25cm のコンクリート舗装版の長期観測^[1]より導出されたものであるが、版厚の厚い空港コンクリート舗装ではこれよりも温度応力が小さくなることが既往の研究で確認されている^{[3][4][5]}。

また、コンクリート舗装版に生じる日温度応力は、図 2-3 に示すように軸方向拘束応力、曲げ拘束応力、内部拘束応力の 3 つに分けることができる。軸方向拘束応力は版の軸方向の伸縮が路盤との摩擦や隣接版により拘束されることにより生じる拘束応力、曲げ拘束応力は版上下面の温度差による版の曲げ変形が自重および路盤との摩擦等により拘束されることにより生じる拘束応力、内部拘束応力は版深さ方向の温度分布が非線形になることにより生じる拘束応力である。前述したように、版厚・気象条件により版深さ方向の温度分布の非線形性は大きく変化し、内部拘束応力も大きく異なる。したがって、版厚・気象条件を適切に考慮した温度応力の算定のためには、この内部拘束応力の評価が非常に重要であることをここで明記しておきたい。

日温度応力は、コンクリート舗装版上下面の温度勾配が 0 となる時刻（9:00 頃）から上下面の温度勾配が最大となる時刻（14:00 頃）に対して発生する応力であり、コンクリート舗装版の軸方向の伸縮及び版上下面の温度差が生じるため、軸拘束応力、曲げ拘束応力及び内部拘束応力が発生する。それに対して、長期温度応力は夏から冬にかけてのコンクリート舗装版の温度低下に対して生じる応力であり、コンクリート舗装版の軸方向の伸縮が生じるため、軸方向拘束応力のみ発生する。前述したように長期温度応力は日温度応力と比較して非常に小さいため、現行の設計手法では長期温度応力の影響は考慮しない。参考までに日温度応力と長期温度応力の関係について、図 2-4 に示す。

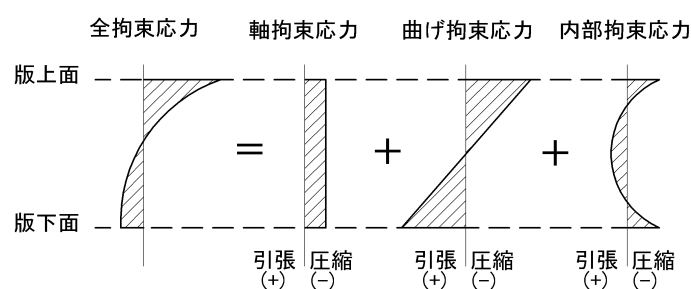


図 2-3 コンクリート版に発生する応力の模式図

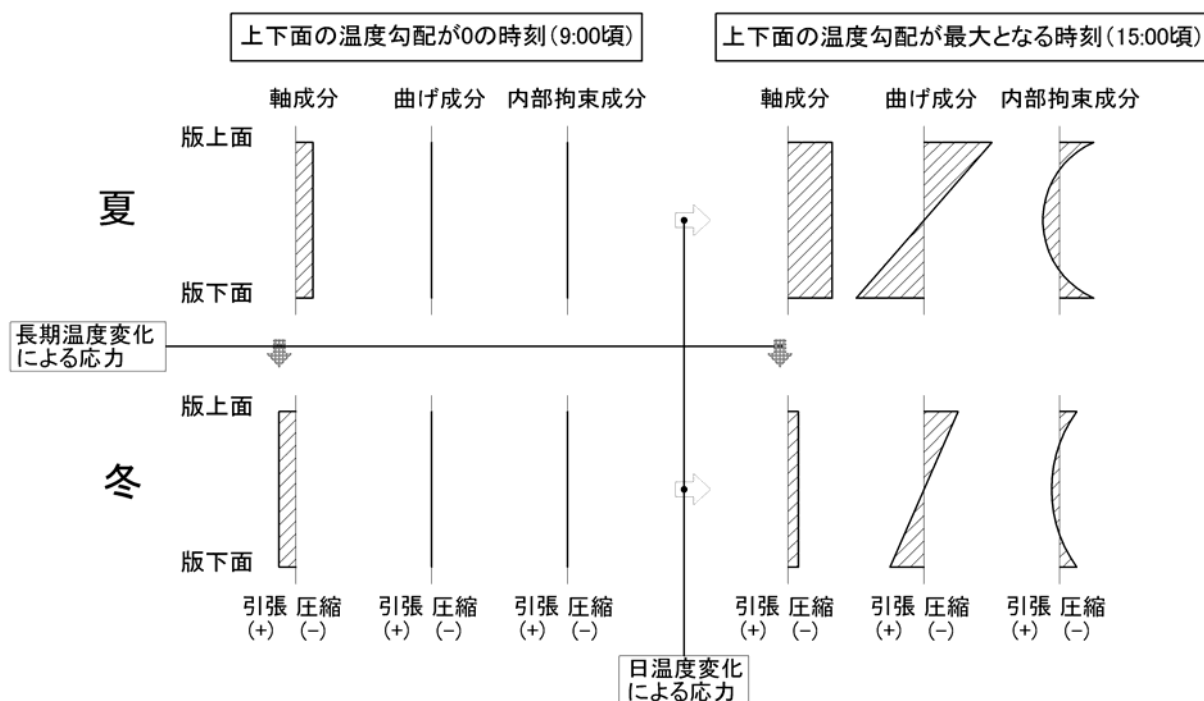


図 2-4 日温度変化により生じる応力と長期温度変化により生じる応力

2.3. ひずみ・温度計測概要および計測データ

2.3.1. コンクリート舗装版のひずみ・温度計測

実大規模のコンクリート舗装版に対して，高強度コンクリートを用いた区画1，および普通コンクリートを用いた区画2において，図 2-5 に示す位置に計測器を配置し，ひずみ・温度の計測を行った．高強度コンクリート・普通コンクリート各々のコンクリート舗装版の寸法は $8.5\text{m} \times 8.5\text{m}$ であり，版厚は 46cm である．各々のコンクリート舗装版に対して，平面的に 6 測点，深度方向に 3 測点のひずみ，および 7 測点の温度を計測した．コンクリート舗装版の計測状況を図 2-6 に示す．

本研究では，打設後材齢 28 日となる時点から 1 年間に渡る長期計測結果を解析対象とした．また，データ解析に用いる線膨張係数はコンクリート舗装版施工時において別途作成した供試体（ $150 \times 150 \times 530$ ）を用いて測定を行った．コンクリート舗装版の弾性係数，およびポアソン比はコンクリート舗装版施工時に，同様に別途作成した供試体（ $\phi 150 \times 300$ ）を用いた材齢 28 日の圧縮試験の結果を用いた．

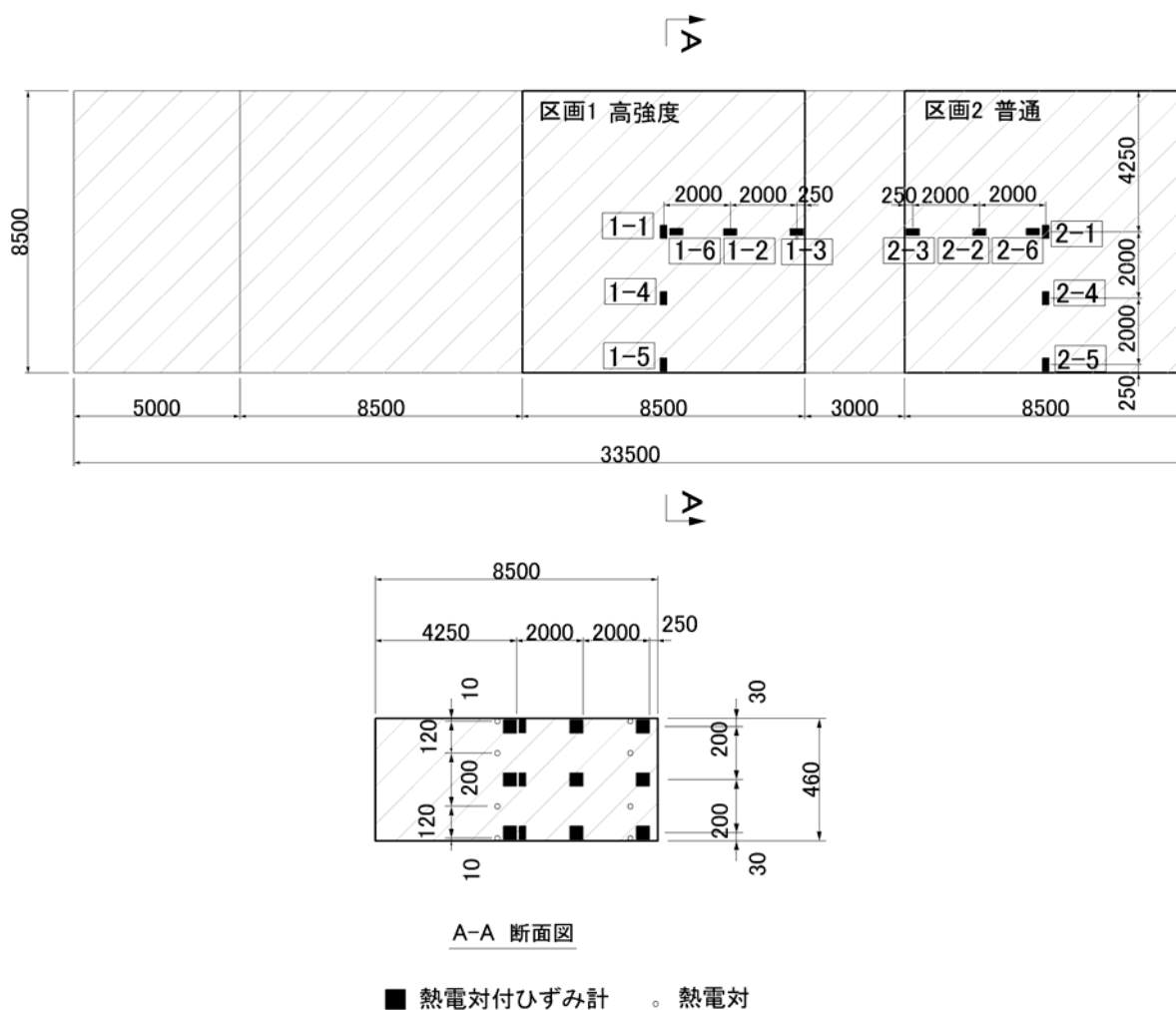


図 2-5 コンクリート舗装版計測位置



図 2-6 コンクリート舗装版計測状況

2.3.2. コンクリートの配合

高強度コンクリートおよび普通コンクリートの配合を表 2-1 に示す。なお、コンクリートの配合は、高強度コンクリートにおいて設計基準曲げ強度 5.5N/mm^2 、普通コンクリートにおいて設計基準曲げ強度 5.0N/mm^2 を、かつフレッシュコンクリートの性状として、スランプ= $3.5\pm 1.0\text{cm}$ 、空気量= $5.5\pm 1.5\%$ を満たすように、配合試験を行い決定している。更に、良質な砕石と砂を使用することにより、ワーカビリティの良いコンクリートを製造し、空港舗装コンクリートに要求される舗装面の仕上げを満足するようにした。

このようにして決定された配合のコンクリートに対して、コンクリート舗装版施工時に別途作成した供試体を用いて曲げ試験を行い、表 2-2 に示すように、設計基準曲げ強度を満足することも確認している。

表 2-1 コンクリートの配合

	配合										
	C/W	W/C	単位	s/a	単位量 (Kg/m ³)				混和剤		
		(%)	粗骨 材容 積	(%)	W	C	S	4020	2005	AE 減水剤 (G×%) (Kg/m ³)	AE 剤
高強度 コンクリート	27	37	0.76	32.7	134	362	599	511	759	1.0 (ホゾリス No. 15S)	マイクロー NO. 775S
普通 コンクリート	22	45.5	0.76	35.9	127	279	685	511	759	1.0 (ホゾリス No. 15S)	

表 2-2 材齢 28 日の曲げ強度試験結果

コンクリート	配合強度 (N/mm ²)	設計基準強度 (N/mm ²)	試験結果 (N/mm ²)
高強度	6.50	5.50	6.77
普通	5.85	5.00	5.73

2.3.3. データ解析の要素試験結果

線膨張係数の測定は、材齢 28 日以降の供試体に対して、図 2-7 に示すように供試体の中心温度が 20℃の時点をもとに 20→60→10→60→10→20℃のサイクルで温度変化を与えた場合の、供試体のひずみおよび温度を測定することにより行なった。線膨張係数の測定の様子を図 2-8 に示す。

表 2-3 に示す測定結果より、高強度コンクリートは線膨張係数 $\alpha = 8.89 \mu / ^\circ\text{C}$ 、普通コンクリートは線膨張係数 $\alpha = 8.97 \mu / ^\circ\text{C}$ とした。

また、高強度コンクリート及び普通コンクリートの圧縮試験結果を表 2-4 に示す。試験結果より、高強度コンクリートは弾性係数 $E = 39,900 \text{ N/mm}^2$ 、ポアソン比 $\nu = 0.206$ 、普通コンクリートは弾性係数 $E = 41,700 \text{ N/mm}^2$ 、ポアソン比 $\nu = 0.204$ とした。

これらの算定結果は後述する温度応力の算定の際に用いた。

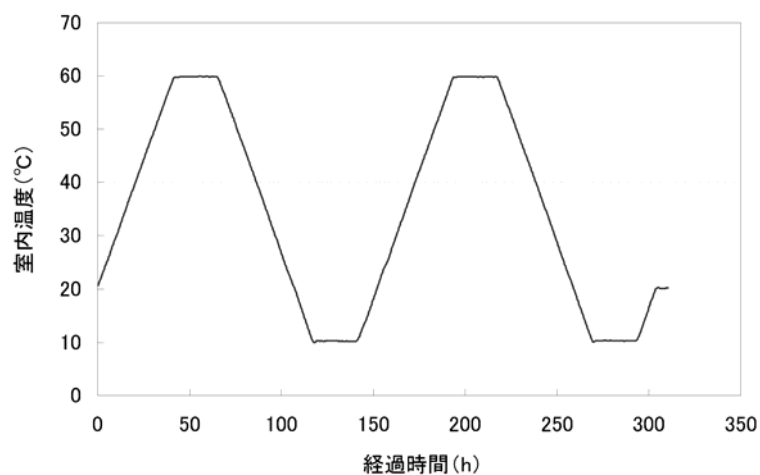


図 2-7 温度変化のサイクル



図 2-8 線膨張係数の測定（左：供試体の保水状況，右：恒温高湿槽設置状況）

表 2-3 線膨張係数測定結果

供試体 No.	高強度			普通		
	1	2	3	1	2	3
上昇 1	8.24	8.44	8.45	9.09	8.55	8.73
下降 1	9.11	9.47	9.30	9.60	9.02	8.85
上昇 2	8.33	8.77	8.83	9.10	8.58	8.63
下降 2	8.98	9.45	9.34	9.57	8.98	8.90
平均	8.67	9.03	8.98	9.34	8.78	8.78
3 体の平均	8.89			8.97		

表 2-4 圧縮試験結果

	試供体 No.	圧縮強度 (N/mm ²)		圧縮静弾性係数 (N/mm ²)		ポアソン比	
		計測値	平均	計測値	平均	計測値	平均
高強度	1	53.0	52.0	40,800	41,200	0.200	0.200
	2	51.5		42,300		0.197	
	3	51.5		40,400		0.202	
	1	50.2	49.2	41,400	41,200	0.205	0.204
	2	49.4		40,300		0.211	
	3	48.1		41,900		0.196	
	1	48.4	49.1	39,400	39,900	0.211	0.205
	2	50.2		39,400		0.211	
	3	48.6		41,000		0.194	
	1	53.2	53.7	39,900	38,800	0.201	0.202
	2	53.9		38,000		0.203	
	3	53.9		38,500		0.203	
	1	45.7	44.7	38,500	38,200	0.207	0.219
	2	44.5		38,200		0.223	
	3	44.0		38,000		0.227	
普通	1	39.1	40.6	42,100	41,700	0.199	0.204
	2	41.0		41,700		0.199	
	3	41.8		41,400		0.215	
高強度平均			49.7		39,900		0.206
普通平均			40.6		41,700		0.204

2.3.4. ひずみ・温度計測データ

図 2-5 および図 2-6 に示すようなコンクリート舗装版に対して、ひずみ・温度計測を 1 年間を通して行った。全ての計測位置において、1 時間毎にひずみ・温度を同時に計測した。ここでは、

計測結果の代表的なものとして高強度コンクリート(区画 1)の版中央部(計測位置：1-1)および版縁部(計測位置：1-5)，および普通コンクリート(区画 2)の版中央部(計測位置：2-1)および版縁部(計測位置：2-5)におけるひずみゲージおよび熱電対から得られた測定結果を，図 2-9～図 2-12 に示す．なお，ひずみ計には，ひずみ計自体の温度収縮及び温度変化によるひずみ計の零点移動が生じるため，ひずみ計の生データから実ひずみを求める際には，下式による補正を施した．

$$\varepsilon_2 = C_\varepsilon \times \varepsilon_1 + 11.7 \times \Delta t - C_\varepsilon \times \chi \quad \text{式 (2-1)}$$

ここに，

ε_2 : 実ひずみ (μ)

C_ε : 校正係数

ε_1 : 初期値からの指示値の変化 (μ)

Δt : 小型供試体打設後の最高温度からの温度差 ($^{\circ}\text{C}$)

χ : ひずみ計の零点移動量

11.7 : ひずみ計の零点移動量測定時に用いた治具の線膨張係数 (μ)

測定データには，悪天候の影響等によりノイズが生じているが，これらのノイズは，以降のデータ整理をする際には取り除いた．また，ひずみの 0 点は，打設後の水和発熱によりコンクリート版が最高温度に達する点とした．

年間を通して，ひずみ・温度が同様の挙動を示しており，これらの計測結果が妥当なものであることが確認された．中央部・縁部ともに，冬季において最大の収縮ひずみとして 500(μ)程度のひずみを示していることが分かる．また，中央部において版深度方向におけるひずみの差が殆どないのに対し，版縁部においては版深度方向のひずみの差が大きい．これは，版中央部の拘束が大きいのに対し，版縁部は拘束の影響が小さいためと考えられる．また，温度計測結果について，中央部・縁部ともに夏期において上面部の最高温度 48($^{\circ}\text{C}$)程度を示しており，平均温度の年間の変動幅は 47($^{\circ}\text{C}$)程度であった．

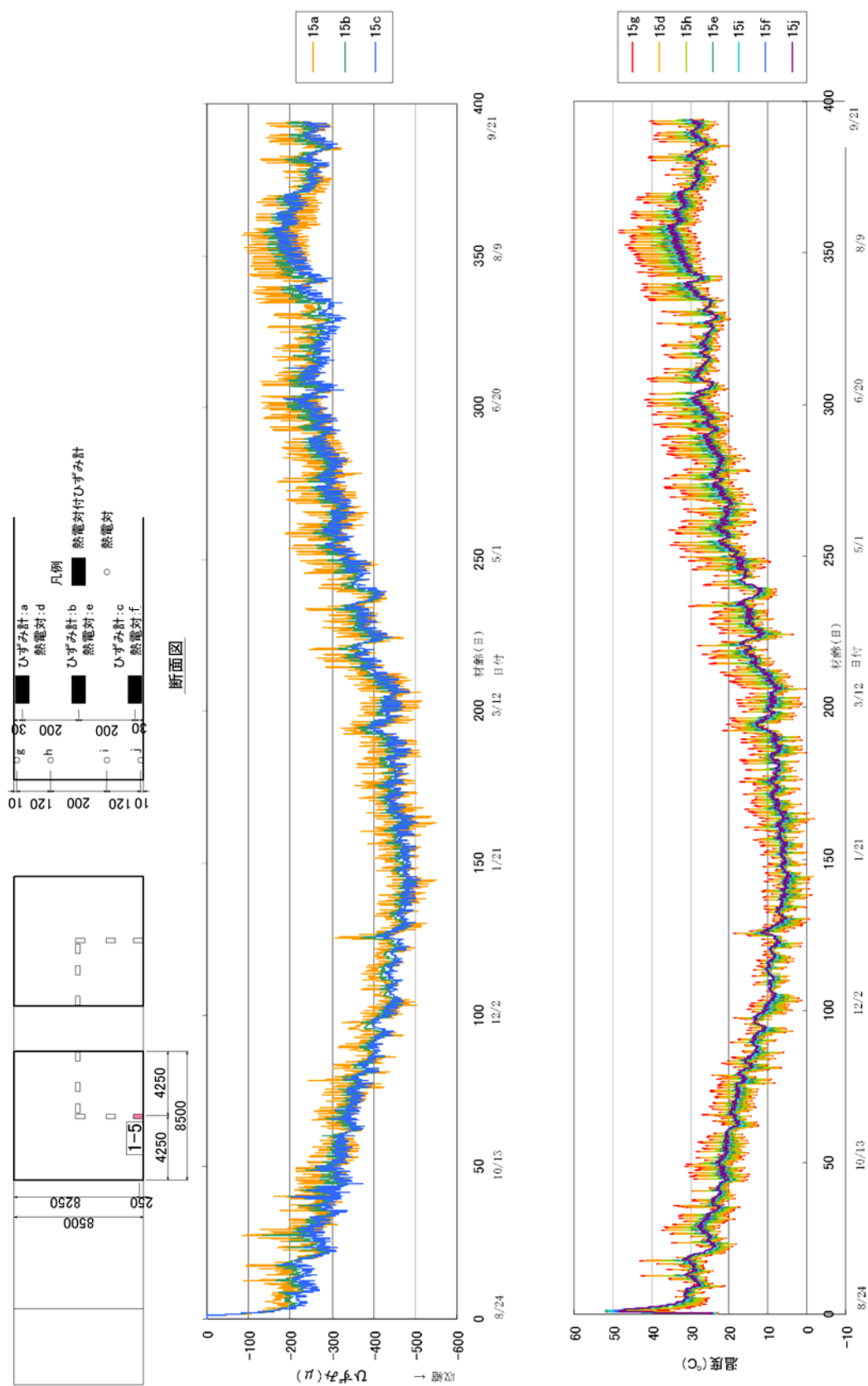


図 2-10 ひずみ・温度計測結果 (高強度コンクリート：版縁部：計測位置 1-5)

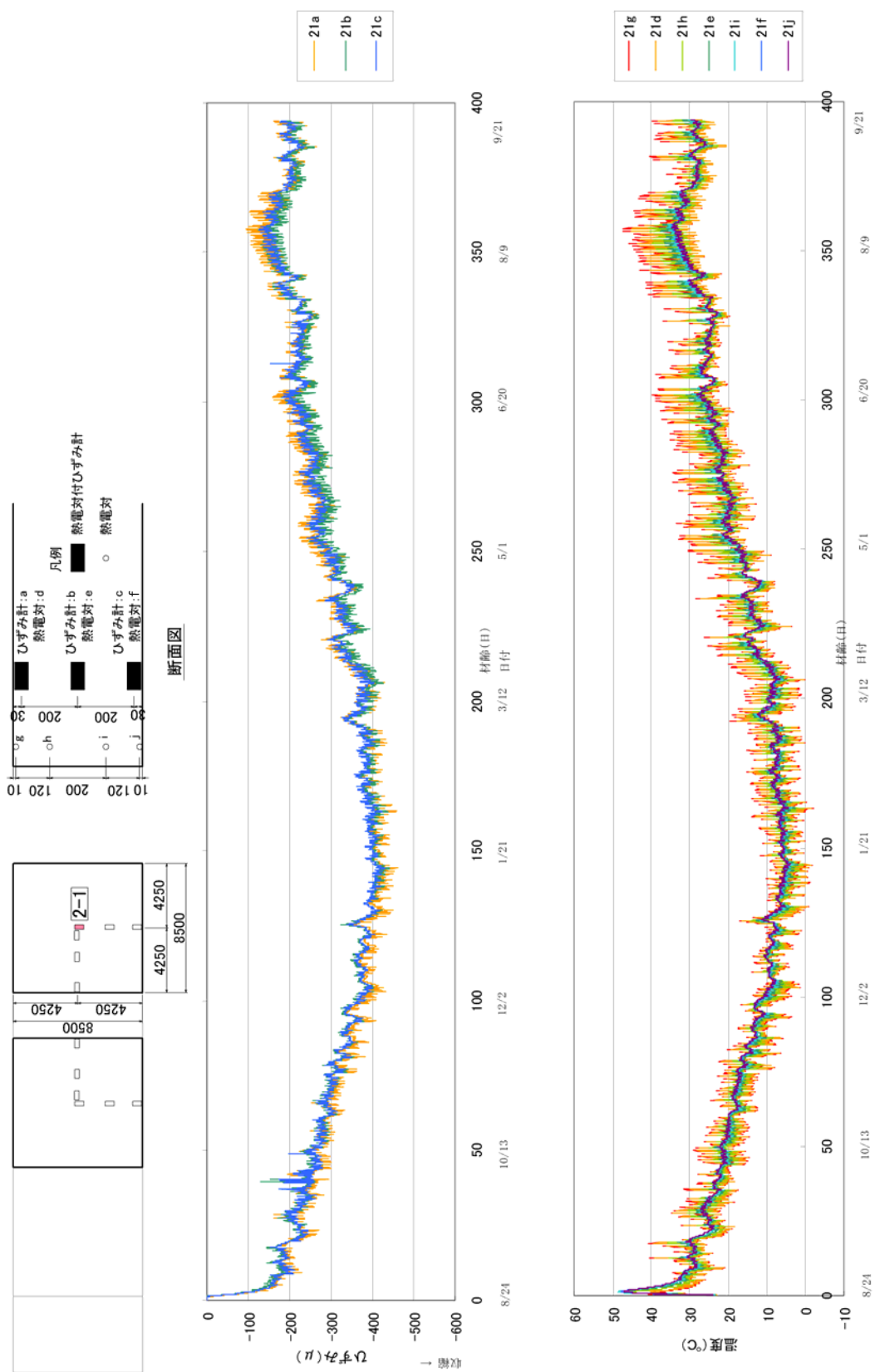


図 2-11 ひずみ・温度計測結果（普通コンクリート：版中央部：計測位置 2-1）

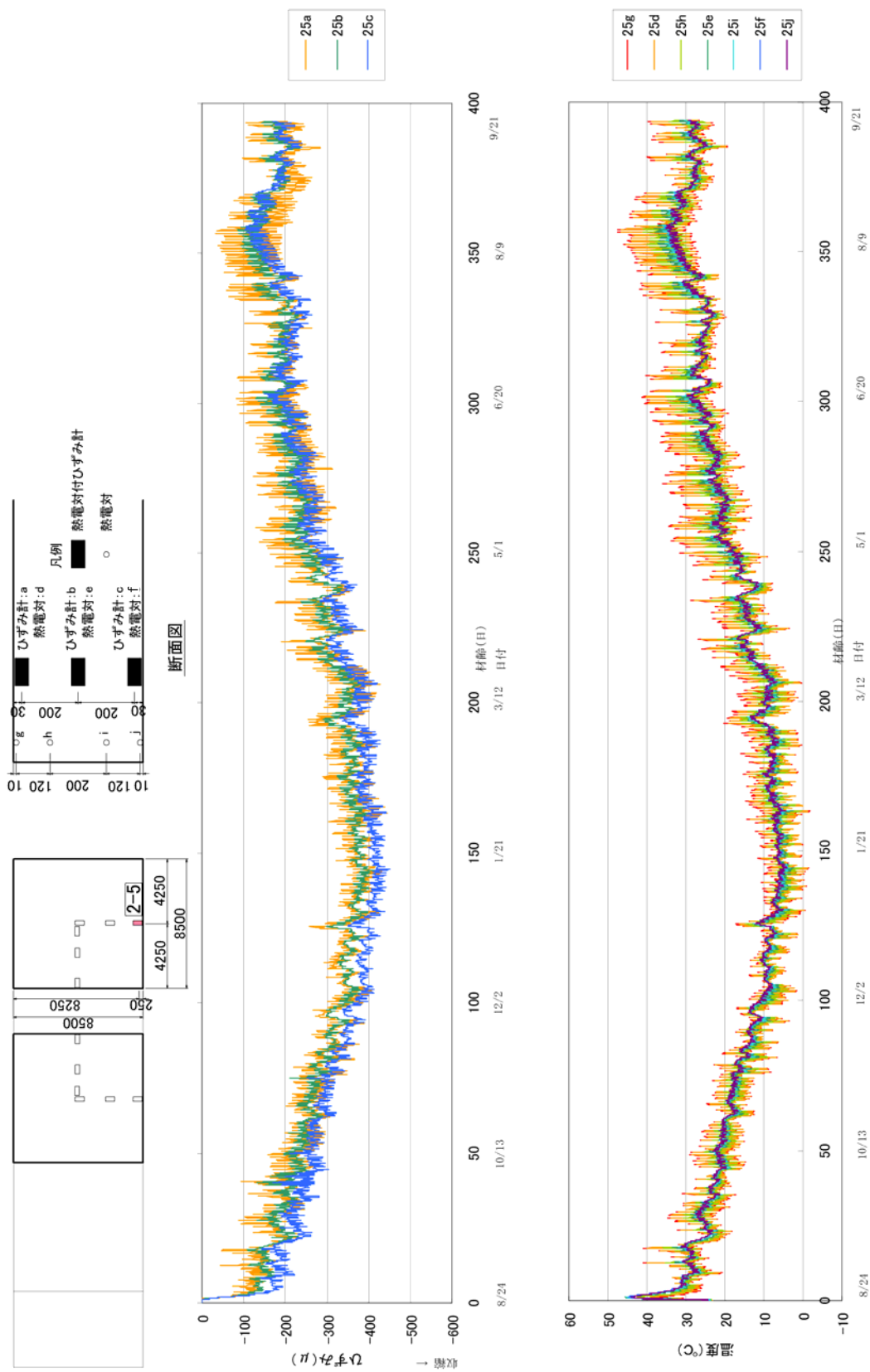


図 2-12 ひずみ・温度計測結果（普通コンクリート：版縁部：計測位置 2-5）

2.4. ひずみ・温度計測結果に基づく温度応力

2.4.1. 日温度変化により生じるコンクリート舗装版上下面の温度差

高強度コンクリート舗装版，普通コンクリート舗装版について，版上下面温度差とその発生頻度をまとめた結果を表 2-5，表 2-6 にそれぞれ示す．版上下面温度差が正となるのは上面の温度が下面の温度より大きくなる場合であり，逆に版上下面温度差が負となるのは下面の温度が上面の温度より大きくなる場合である．

高強度コンクリートと普通コンクリートで上下面温度差の頻度について大きな差は見られない．両者とも版上下面の温度差が負となる割合が，正となる割合と比べて高くなっている．また，気温が高くなる春期から夏期にかけては版上下面温度差が正となる割合が大きくなり，気温が低くなる秋期から冬期にかけては小さくなっていることが分かる．版上下面温度差の最大値は 15(°C) 程度であり，気温が高くなる 8 月において発生する割合が最も大きい．

また，現行の指針^[6]において，一例として示されている版厚 30cm の場合の版上下面温度差発生頻度と，今回の結果を比較したものを表 2-7 および図 2-13 に示す．今回計測結果は「舗装設計便覧」における「温度差の小さいところ」の版上下面温度差発生頻度と，版上下面温度差が大きい範囲では同様の挙動を示しているが，版上下面温度差が小さい範囲（-3°C～0°C 付近）では異なる．一方で，今回計測結果は「舗装設計便覧」における「温度差の大きいところ」の版上下面温度差発生頻度とでは，版上下面温度差が小さい範囲では同様の挙動を示しているが，版上下面温度差が大きい範囲（15°C～20°C 付近）では異なる．

このように，現行の指針において示されている版上下面温度差発生頻度と，実際のコンクリート舗装版に生じる版上下面温度差発生頻度は，曝されている気象条件および版厚が異なるため完全には一致しておらず，この差異が疲労度に対しても影響すると考えられる．

表 2-5 コンクリート版上下面温度差とその発生頻度（高強度コンクリート）

温度差	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	計
19	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
17	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000
15	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.016	0.030	0.037	0.027	0.028	0.000	0.014
13	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.017	0.042	0.073	0.104	0.047	0.130	0.038	0.044
11	0.014	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.054	0.062	0.121	0.118	0.066	0.135	0.094	0.062
9	0.070	0.022	0.000	0.004	0.011	0.031	0.092	0.107	0.115	0.109	0.080	0.122	0.105	0.075
7	0.126	0.118	0.044	0.030	0.035	0.157	0.159	0.149	0.116	0.121	0.101	0.115	0.083	0.110
5	0.199	0.213	0.151	0.088	0.162	0.261	0.189	0.145	0.146	0.122	0.110	0.125	0.120	0.153
3	0.260	0.295	0.320	0.274	0.310	0.239	0.217	0.172	0.162	0.139	0.152	0.157	0.222	0.210
1	0.332	0.350	0.484	0.604	0.483	0.312	0.273	0.305	0.237	0.250	0.415	0.187	0.337	0.332
-1	0.187	0.258	0.298	0.386	0.378	0.329	0.327	0.362	0.336	0.348	0.506	0.256	0.316	0.337
-3	0.374	0.399	0.334	0.234	0.319	0.287	0.277	0.305	0.410	0.460	0.414	0.436	0.551	0.360
-5	0.395	0.321	0.242	0.242	0.202	0.245	0.262	0.284	0.185	0.190	0.080	0.302	0.128	0.233
-7	0.044	0.022	0.088	0.134	0.101	0.132	0.133	0.042	0.066	0.002	0.000	0.006	0.006	0.064
-9	0.000	0.000	0.039	0.005	0.000	0.007	0.000	0.007	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005
-11	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
正の温度差の割合	0.308	0.279	0.284	0.253	0.304	0.394	0.461	0.454	0.471	0.467	0.422	0.481	0.396	0.386
負の温度差の割合	0.692	0.721	0.716	0.747	0.696	0.606	0.539	0.546	0.529	0.533	0.578	0.519	0.604	0.614

表 2-6 コンクリート版上下面温度差とその発生頻度（普通コンクリート）

温度差	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	計
19	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
17	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
15	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008	0.014	0.022	0.022	0.023	0.000	0.009
13	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.033	0.066	0.094	0.047	0.117	0.024	0.038
11	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.046	0.053	0.114	0.118	0.062	0.146	0.100	0.061
9	0.038	0.003	0.000	0.000	0.003	0.007	0.068	0.103	0.116	0.118	0.078	0.122	0.097	0.069
7	0.098	0.085	0.026	0.031	0.020	0.118	0.164	0.158	0.120	0.115	0.101	0.115	0.078	0.103
5	0.224	0.213	0.113	0.073	0.137	0.272	0.203	0.134	0.140	0.129	0.106	0.125	0.134	0.150
3	0.268	0.324	0.339	0.219	0.316	0.272	0.228	0.191	0.178	0.146	0.153	0.154	0.220	0.217
1	0.371	0.375	0.522	0.677	0.525	0.331	0.286	0.322	0.252	0.259	0.429	0.198	0.348	0.352
-1	0.223	0.301	0.318	0.397	0.396	0.346	0.337	0.367	0.354	0.373	0.545	0.293	0.370	0.362
-3	0.405	0.399	0.337	0.236	0.313	0.275	0.287	0.336	0.412	0.477	0.396	0.458	0.514	0.362
-5	0.343	0.288	0.228	0.248	0.206	0.251	0.251	0.255	0.174	0.149	0.058	0.245	0.103	0.214
-7	0.029	0.012	0.084	0.117	0.085	0.124	0.125	0.038	0.056	0.001	0.001	0.003	0.012	0.057
-9	0.000	0.000	0.032	0.003	0.000	0.004	0.000	0.004	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004
-11	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
正の温度差の割合	0.310	0.274	0.279	0.249	0.293	0.393	0.462	0.461	0.482	0.475	0.430	0.490	0.408	0.389
負の温度差の割合	0.690	0.726	0.721	0.751	0.707	0.607	0.538	0.539	0.518	0.525	0.570	0.510	0.592	0.611

表 2-7 版上下面温度差発生頻度の比較

ケース	今回計測結果		舗装設計便覧		備考
版厚	46cm		30cm		
その他条件	高強度 コンクリート	普通 コンクリート	温度差の 小さいところ	温度差の 大きいところ	
温度差					
19	0.000	0.000	0.000	0.012	温度差が正の 時間に対する 割合
17	0.000	0.000	0.000	0.020	
15	0.014	0.009	0.007	0.038	
13	0.044	0.038	0.025	0.040	
11	0.062	0.061	0.053	0.045	
9	0.075	0.069	0.080	0.080	
7	0.110	0.103	0.115	0.105	
5	0.153	0.150	0.140	0.125	
3	0.210	0.217	0.210	0.185	
1	0.332	0.352	0.370	0.350	温度差が負の 時間に対する 割合
-1	0.337	0.362	0.480	0.390	
-3	0.360	0.362	0.380	0.320	
-5	0.233	0.214	0.120	0.230	
-7	0.064	0.057	0.020	0.055	
-9	0.005	0.004	0.000	0.005	
-11	0.000	0.000	0.000	0.000	

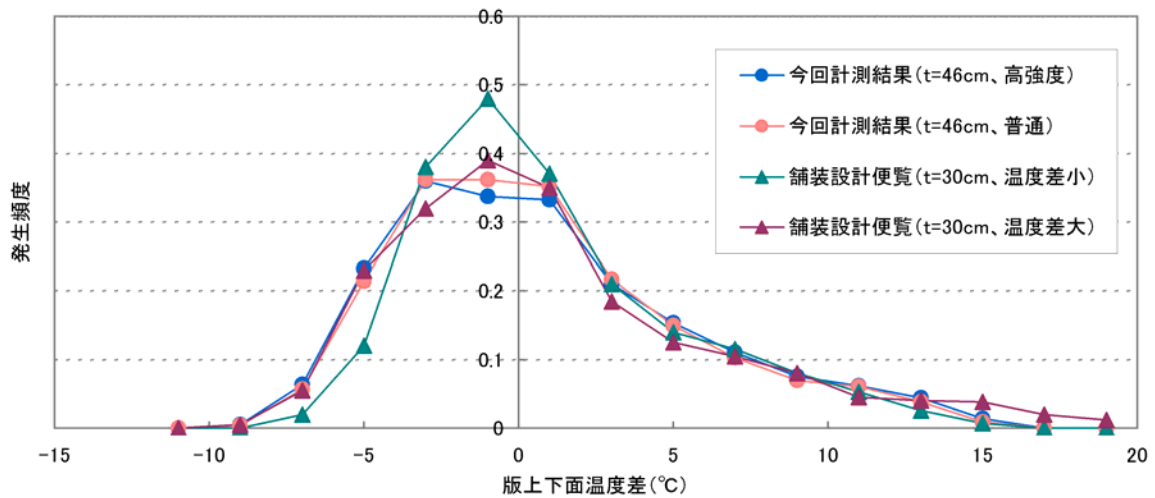


図 2-13 版上下面温度差発生頻度の比較

2.4.2. 日温度変化により生じる拘束応力

空港舗装の場合、航空機の車輪が舗装の自由縁部を通過することは殆どなく、全ての目地に適切な荷重伝達装置を考慮していることから、荷重応力の算定には Westergaard の中央部載荷公式が一般に適用されている^[7]。このことから、従来は空港コンクリート舗装に発生する温度応力としては、版中央部のものが着目されてきた。しかしながら、航空機荷重が版縁部を通過する際に発生する荷重応力も非常に大きくなることから、疲労度設計においては、版縁部の応力状態についても評価する必要がある。したがって、本研究では、版中央部のみではなく版縁部についての検討も合わせて実施した。

日温度応力を構成する軸方向拘束応力、曲げ拘束応力及び内部拘束応力について、図 2-14 および下記に示す方法により算出する。

- ① 1 日のうちでコンクリート版厚方向の温度差が最小になるとき（朝 8:00 又は 9:00 頃）からの実ひずみ変化量、温度変化量を求める。
- ② ひずみの測定点における実ひずみ変化量について、最小二乗法により 2 次曲線近似した版厚方向の実ひずみ分布を描く。同様に、温度の測定点における温度変化量に線膨張係数を乗じることによって算出される温度ひずみ分布を 2 次曲線近似して描く。この実ひずみおよび温度ひずみ分布より、コンクリート版下面の値を外挿する。
- ③ 実ひずみ分布および温度ひずみ分布について、2 次曲線の左右の面積が等しくなるように 1 次近似直線を引きコンクリート版下面の値を外挿する。2 次曲線と 1 次直線の差分が内部拘束成分となる。さらに、1 次直線を曲げ拘束成分と軸拘束成分に分ける。深さ方向の分布は下式のように表される。

$$f(z) = a + \phi \cdot z + g(z) \quad \text{式 (2-2)}$$

ここに、

- z : 版深さ
 $f(z)$: 版深度方向のひずみ・温度分布
 a : 軸拘束成分
 ϕ : 曲げ拘束成分の傾き
 $g(z)$: 内部拘束成分

- ④ 下式に示すように、実ひずみの各成分から温度ひずみの各成分をそれぞれ差し引くことで拘束ひずみの各成分を求め、これにヤング係数を乗じることによって拘束応力の各成分を求める。

$$\sigma_T = E_c (\varepsilon - \varepsilon_T) \quad \text{式 (2-3)}$$

ここに、

- σ_T : 拘束応力の各成分

E_c : コンクリート舗装版のヤング係数

ε : 実ひずみの各成分

ε_T : 温度ひずみの各成分

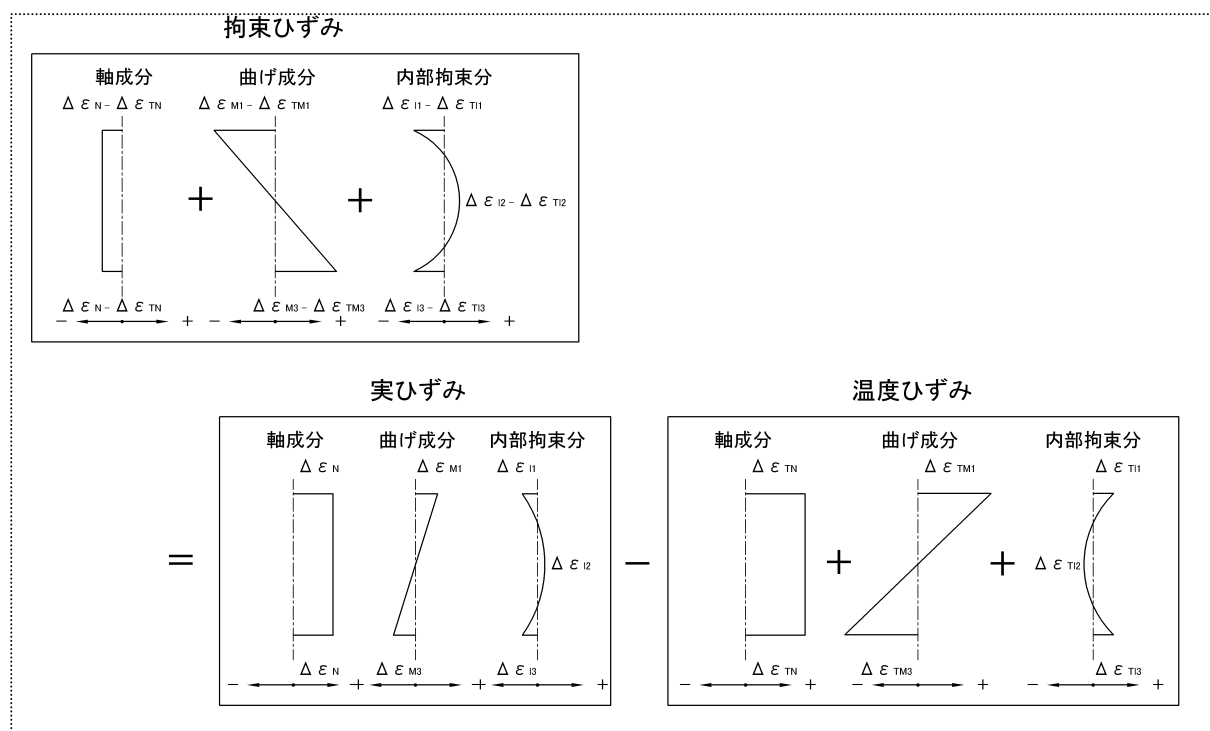
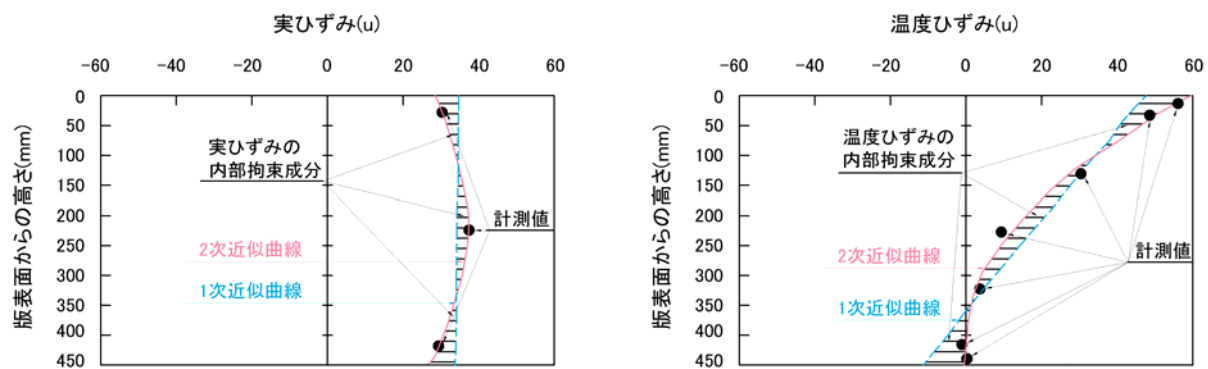


図 2-14 各拘束ひずみの算出方法

上記の方法により、軸方向拘束応力、曲げ拘束応力、内部拘束応力、全拘束応力（3成分の和）を各々算出した。版上下面温度差が最も小さくなる冬期、および版上下面温度差が最も大きくなる夏期における版中央部(計測位置 1-6, 2-6)及び版縁部(計測位置 1-5, 2-5)の高強度コンクリートと普通コンクリートの各応力を比較したものを各々図 2-15, 図 2-16 に示す。

各成分の経時的挙動及び引張応力の最大値について、高強度コンクリートと普通コンクリートを比較した結果、版縁部において多少の差異は認められたものの有意な差はみられなかった。

版中央部の結果において、曲げ拘束応力は日中に引張側の最大値を示している。それに対して、内部拘束応力は日中に圧縮側の最大値を示し、夜間に引張側の最大値を示していることが分かる。また、軸方向拘束応力は概ね小さい値を示しており、曲げ拘束応力が最大となる時刻には圧縮応力となっていることが分かる。これは、曲げ拘束応力が最大となる時刻は温度上昇期であり、その時刻では版は膨張変形するが路盤との摩擦や隣接版の拘束があるため、軸方向拘束応力は圧縮となると考えられる。このように、各拘束成分の位相が微妙にずれているため複雑な様相を呈しているものの、全体として1日周期の変化となっている。

版縁部の結果においては、曲げ拘束応力・内部拘束応力ともに日中に圧縮側の最大値を示し、夜間に引張側の最大値を示している。このように版中央部とは逆に日中において圧縮側の最大値を示していることから、版縁部では温度差が正となった場合に版中央部とは逆の傾向を示していることが分かる。また、軸方向拘束応力については版中央部と比べて多少引張応力が出ているもののその値は非常に小さく、版中央部と同様に曲げ拘束応力が最大となる時刻には圧縮応力となっている。ただし、本研究での長期計測における版縁部の結果は、計測点 1-5 に配置されたひずみゲージのある 1 方向（今回の計測では版軸直角方向）の結果である。4 章において後述する 3DFEM の結果から示されるように、温度応力は違う方向（今回の計測では版軸方向）のものが大きくなり、また温度応力の挙動も異なると考えられる。

A	B	C 高強度	D 普通
		1-6	2-6

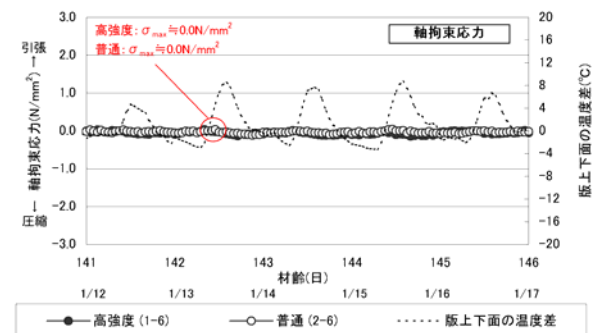
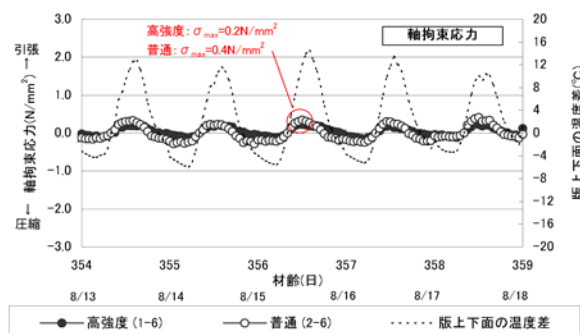
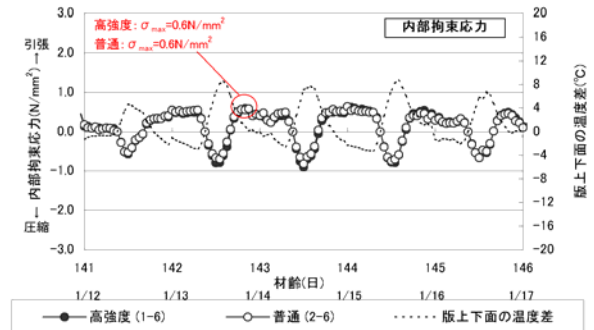
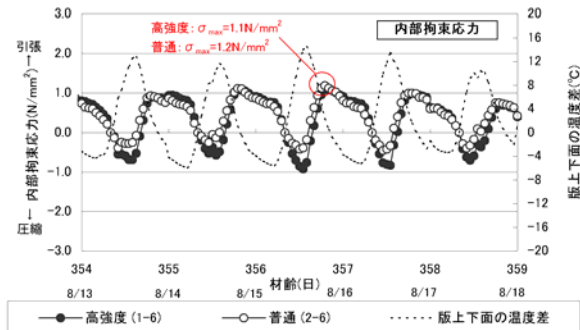
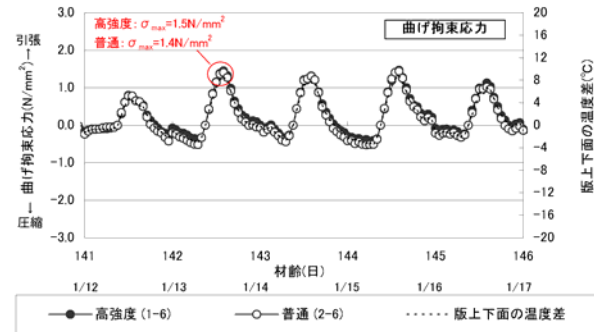
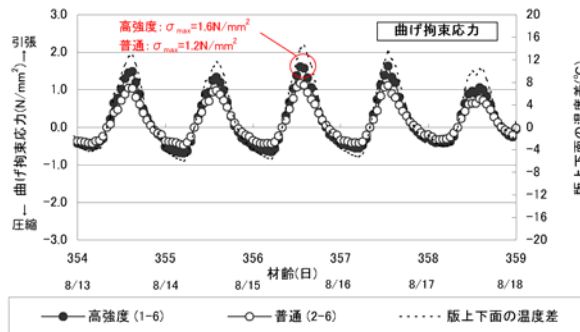
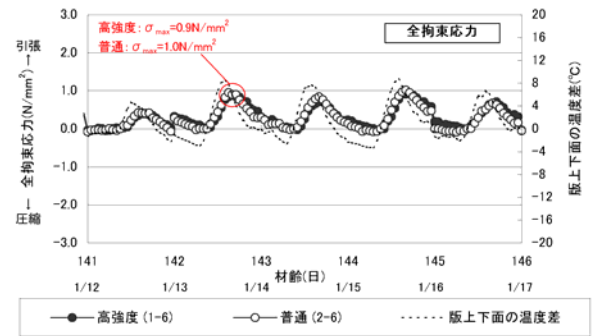
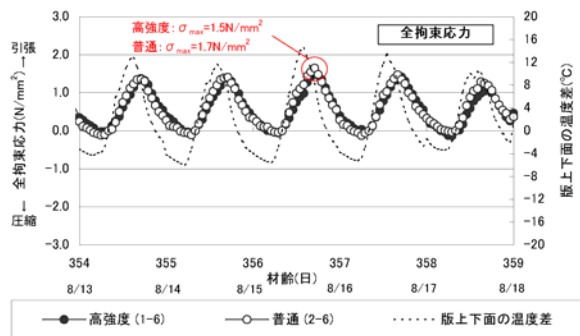


図 2-15 版中央部（計測位置 1-6, 2-6）における日温度変化による拘束応力
（左：夏期・右：冬期）

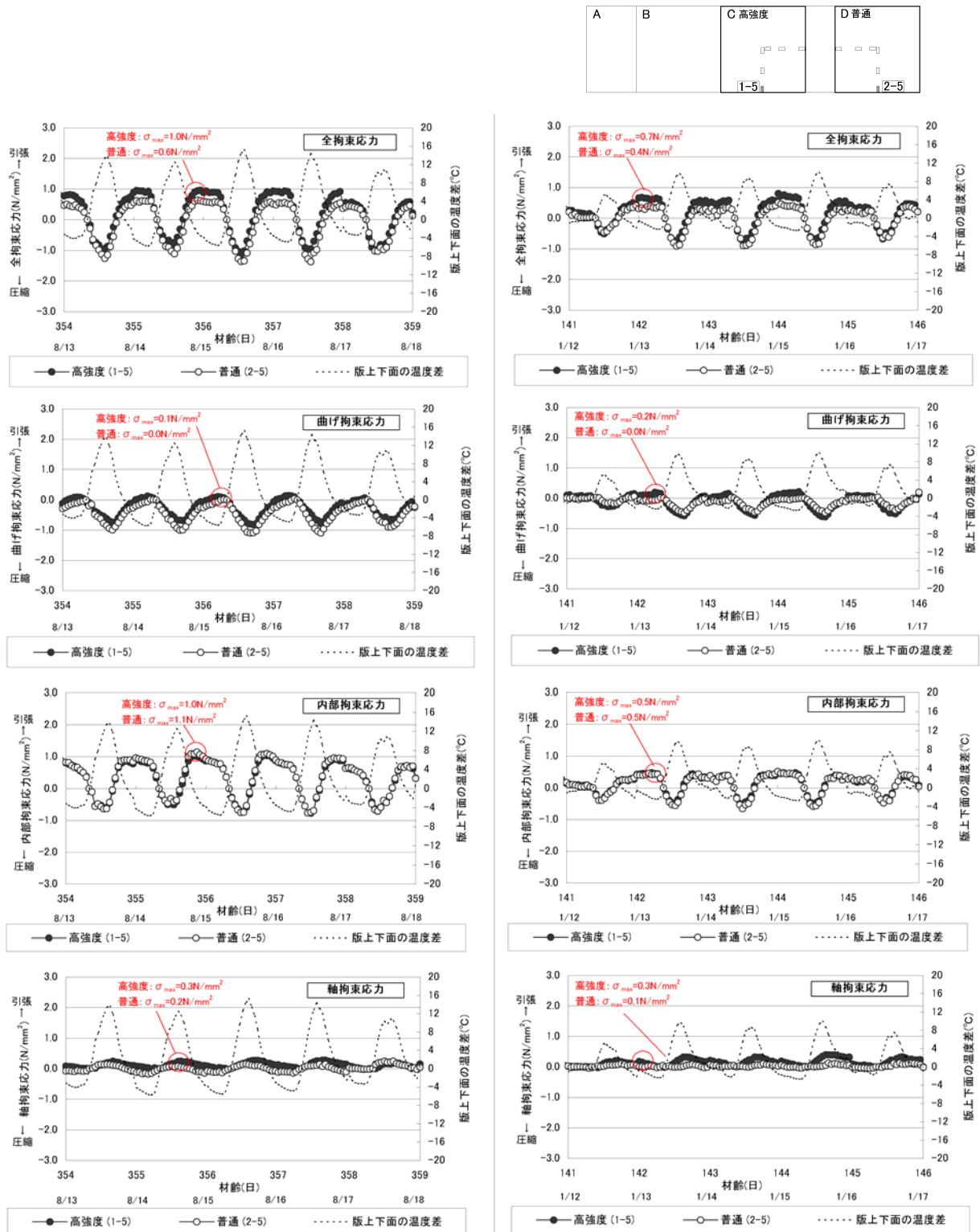


図 2-16 版縁部（計測位置 1-5, 2-5）における日温度変化による拘束応力
（左：夏期・右：冬期）

2.4.3. 日温度変化により生じる温度応力

温度応力は、曲げ拘束応力と内部拘束応力の和として算出される。軸方向拘束応力については、引張応力になる場合の大きさが他の拘束応力と比較しても小さいこと、およびコンクリート舗装版下面の曲げ拘束応力が大きくなるのは温度上昇期となる昼間となる傾向があるが、この時点では軸方向拘束応力は温度上昇により版の膨張変形が路盤との摩擦や隣接版により拘束されるため概ね圧縮応力となるため、設計上無視しても安全側であることから設計上考慮しない^[1]。前章の結果からも、軸方向拘束応力は非常に小さく、曲げ拘束応力が大きくなる時刻には圧縮応力となることが確認されている。

(1) 温度応力の日変動

版上下面温度差が小さい冬期および版上下面の温度差が大きい夏期の版中央部(計測位置 1-6, 2-6)及び版縁部(計測位置 1-5, 2-5)における高強度コンクリートと普通コンクリートの温度応力と版上下面の温度差の日変動を図 2-17, 図 2-18 に示す。特に夏期については、1 年間を通じて版底面の温度応力が最大値を示すある 1 日の結果を示す。

冬期・夏期ともに、高強度コンクリートと普通コンクリートでは同様の挙動を示している。版上下面温度差が最も大きく、温度応力も大きくなる夏期において、版中央部(計測位置 1-6, 2-6)で高強度コンクリート： 1.4N/mm^2 、普通コンクリート： 1.5N/mm^2 、版縁部(計測位置 1-5, 2-5)で高強度コンクリート： 0.9N/mm^2 、普通コンクリート： 0.8N/mm^2 と同程度の値となっている。これらのことから配合による温度応力の差異は殆どないことが確認された。

版中央部の結果については、冬期・夏期ともに、版上下面の温度差が最大となる 14 時頃に曲げ拘束応力は最大となるが、内部拘束応力はこの時点で圧縮応力であり、そのため曲げ拘束応力と内部拘束応力の和である温度応力は版上下面温度差が最大となる時刻から 3 時間程度遅れて 17 時頃に最大となっている。このような曲げ拘束応力と内部拘束応力の位相差の存在については、岩間が指摘しており、温度応力（曲げ拘束応力＋内部拘束応力）／曲げ拘束応力は 0.7 程度としている^[1]。しかし、後述するように版厚の厚い空港舗装の場合は内部拘束応力が大きくなり、曲げ拘束応力が最大となる時間帯では大きな圧縮応力となることから、曲げ拘束応力の最大値は、岩間が提案している温度応力式によるものと比較して小さくなることが指摘されている^[3]。

一方で、版縁部の結果については版中央部の結果とは異なり、版上下面温度差が最大値を示す時刻において、曲げ拘束応力・内部拘束応力ともに圧縮側の最大値を示している。しかし、この版縁部の結果は、前述したように、計測点 1-5 に配置されたひずみゲージのある 1 方向（今回の計測では版軸直角方向）の結果である。4 章において後述する 3DFEM の結果から示されるように、温度応力は違う方向（今回の計測では版軸方向）のものが大きくなり、また温度応力の挙動も異なると考えられる。

A	B	C 高強度	D 普通
		1-6	2-6

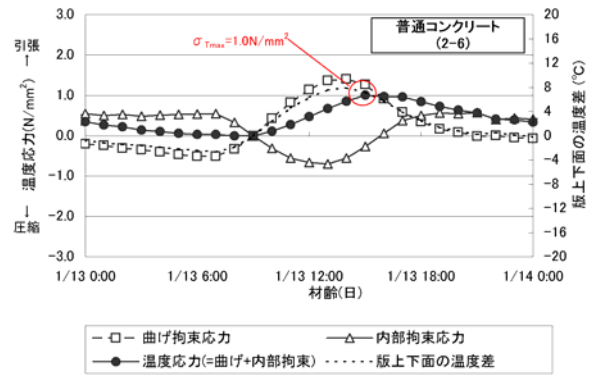
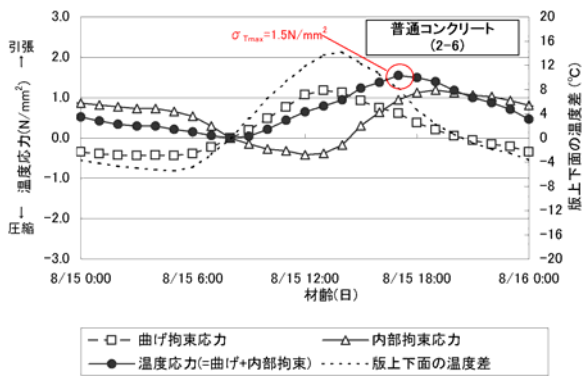
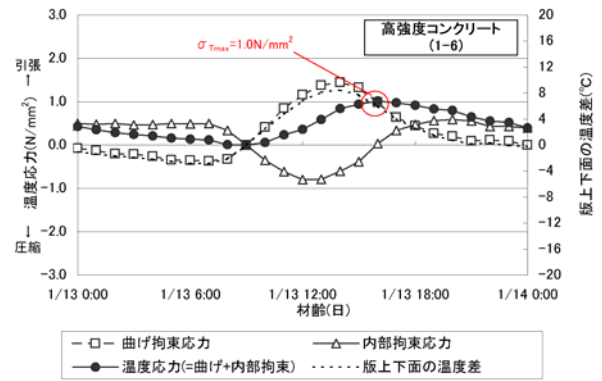
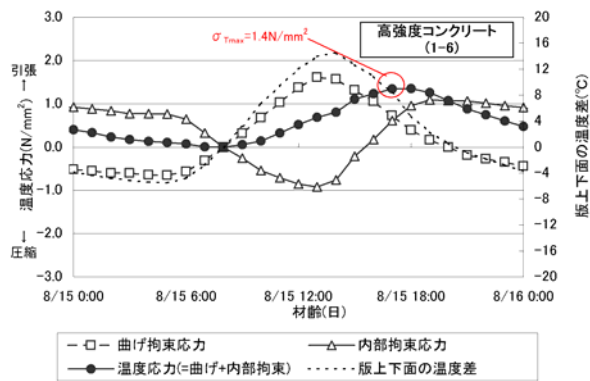


図 2-17 版中央部（計測位置 1-6, 2-6）における温度応力と版上下面の温度差の日変動
（左：夏期・右：冬期）

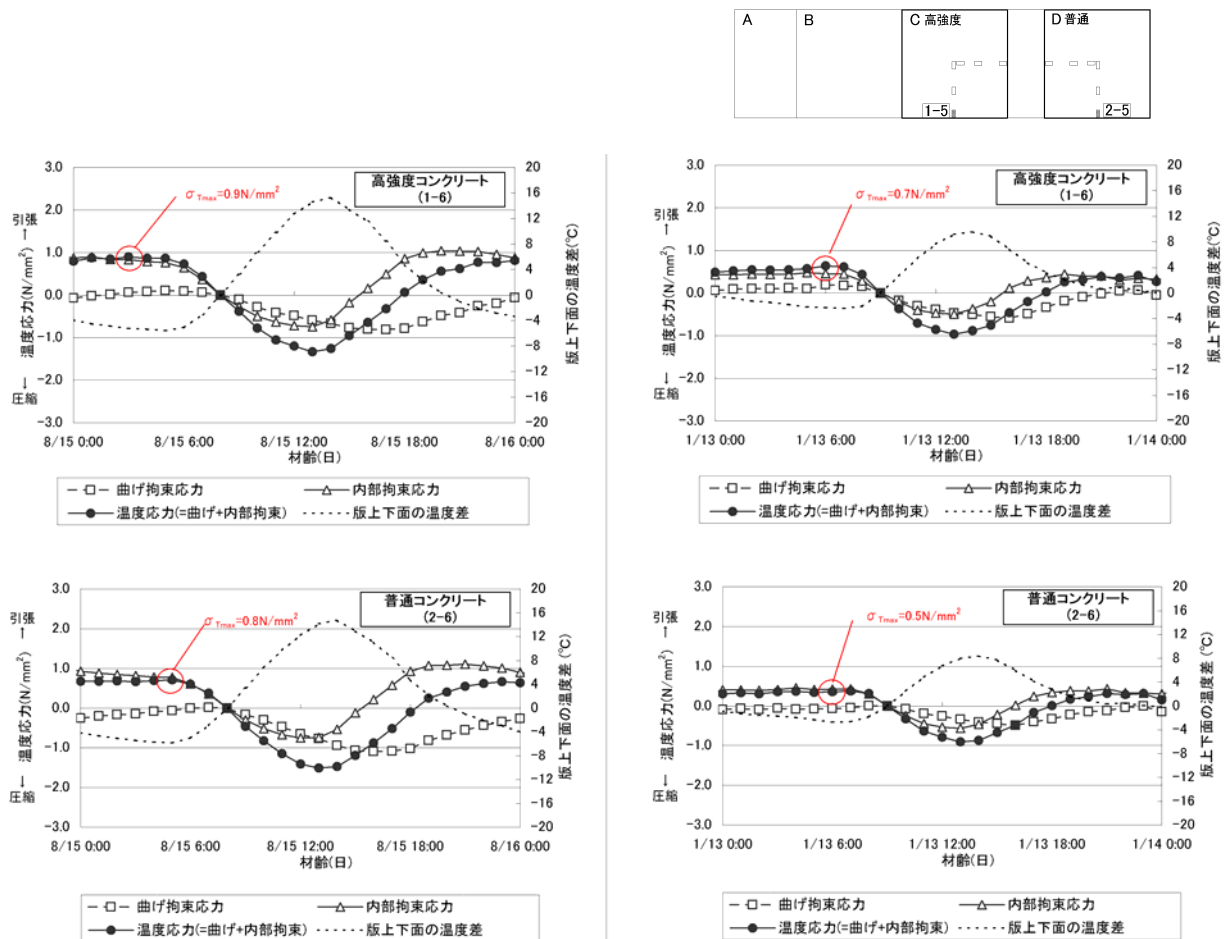


図 2-18 版縁部（計測位置 1-5, 2-5）における温度応力と版上下面の温度差の日変動
（左：夏期・右：冬期）

(2) 既往の温度応力提案式との比較

従来、コンクリート舗装版に生じる温度応力については、岩間の提案式^[1]が一般的に用いられてきた。岩間の提案式は、厚さ 20cm と 25cm のコンクリート舗装版に対する長期計測結果から導出されたものである。この長期計測結果における版底面の日最大温度応力は、曲げ拘束応力の概ね 0.7 倍程度となることが確認されている。これは、版底面の曲げ拘束応力が引張り最大となるときに、版内温度分布の非線形性により生じる内部拘束応力は圧縮となるためである。そこで、版の深さ方向の温度変化が直線であること、すなわち内部拘束応力が 0 であることを仮定して求めた Westergaard の曲げ拘束応力式^[2]に対して、岩間の提案式は、このような曲げ拘束応力に対する内部拘束応力による低減の影響を考慮し 0.7 倍した値を温度応力としている。これらから、コンクリート舗装版の算定式として、下式が一般的に用いられている。

$$\text{コンクリート版中央部：} \quad \sigma_{ie} = 0.7 \cdot \frac{\alpha \cdot E_c \cdot \theta'}{2(1-\nu)} \quad \text{式 (2-4)}$$

$$\text{コンクリート版縁部：} \quad \sigma_{ie} = 0.35 \cdot C_w \cdot \alpha \cdot E_c \cdot \theta' \quad \text{式 (2-5)}$$

ここに、

σ_{ie} : コンクリート版中央部の温度応力 (N/mm²)

σ_{ie} : コンクリート版縁部の温度応力 (N/mm²)

C_w : 曲げ拘束度

α : コンクリートの熱膨張係数 ($\mu / ^\circ\text{C}$)

θ' : コンクリート版上下面の温度差 ($^\circ\text{C}$)

しかし、版厚の厚い空港コンクリート舗装においては、版厚方向の温度分布の非線形性により生じる内部拘束応力が岩間の提案式で想定していたものよりも大きくなる。そのため、空港コンクリート舗装版に生じる温度応力は、従来の岩間の提案式で算出された温度応力よりも小さくなると考えられる。

そこで、坪川らは空港コンクリート舗装 (版厚 42cm) の版中央におけるひずみと温度の長期計測結果を基に、版厚を考慮した版中央部における温度応力の実用的な式を提案している^[8]。この版厚の影響を考慮した提案式は、長期計測結果から推定された日最大温度応力、および有限要素法による熱収支解析から、曲げ拘束度を 0.95 と仮定し推定されたものである。岩間の提案式では曲げ拘束応力に対する内部拘束応力による低減の影響として 0.7 倍した値を温度応力としていたが、坪川の提案式では、 $(-0.772h+0.854)$ 倍 (h : 版厚(m)) した値を温度応力としている。下式に、版上下面温度差と温度応力の位相差を考慮して、版厚 42cm の場合は概ね 3 時間前の版上下面温度差を入力することにより、精度良く温度応力を推定できるとしている^[8]。

$$\text{コンクリート版中央部：} \quad \sigma_{ie} = \beta \cdot \frac{\alpha \cdot E_c \cdot \theta'}{2(1-\nu)} \quad \text{式 (2-6)}$$

$$\beta = -0.772h + 0.854$$

ここに、

h : コンクリート版厚 (m)

版中央部において、ひずみ・温度の計測結果から算定された温度応力と、岩間の提案式：式(2-4)及び坪川の提案式：式(2-6)を用いて算定された温度応力を比較したもの（計測位置 1-6, 2-6）を、図 2-19 に示す。なお、岩間の提案式・坪川の提案式ともに、温度計測データから得られた版上下面温度差を入力しているが、坪川の提案式を用いる場合には、3 時間前の版上下面温度差を入力している。

版上下面温度差が大きくなる 8 月については、岩間の提案式により算定された最大温度応力が高強度コンクリート：2.3N/mm²、普通コンクリート 2.2N/mm²であるのに対して、ひずみ・温度計測結果より算定された最大温度応力は高強度コンクリート・普通コンクリートともに 1.6N/mm²と約 50%程度小さい。岩間の式は版厚 20～25cm の舗装版から導出された算定式であり、今回計測を実施した版厚 46cm のコンクリート舗装版のように版厚が厚い方が、版内部の温度分布の非線形性により生じる内部拘束応力が大きくなるためと考えられる。しかし、版上下面温度差が小さくなる 1 月については、岩間の提案式により算定された最大温度応力が高強度コンクリート：1.3N/mm²、普通コンクリート 1.2N/mm²であるのに対して、ひずみ・温度計測結果より算定された最大温度応力は高強度コンクリート・普通コンクリートともに 1.0N/mm²と約 20%程度小さい結果となっている。このように、気象条件により、岩間の提案式と計測結果より算定された温度応力の差異の度合は異なる。これは、気象条件によりコンクリート舗装版内の温度分布特性が異なるため、曲げ拘束応力に対する内部拘束応力による低減の度合についても差異が生じることを示している。

一方で、坪川の提案式により 3 時間前の版上下面温度差を入力して算定された温度応力については、計測結果より算定されたものとほぼ同程度の最大温度応力となっている。坪川の式は、曲げ拘束係数を 0.95 と仮定しているものの、版厚による版内温度分布の非線形性を考慮した式となっているため、今回計測を実施した版厚 46cm のコンクリート舗装版の温度応力に対しても、最大温度応力は精度良く表現できていると考えられる。

しかし、岩間の提案式・坪川の提案式ともに、最大温度応力以外の温度応力については、計測結果より算定されたものと一致していない。これについても、前述したように、気象条件によりコンクリート舗装版内の温度分布特性が異なるため、曲げ拘束応力に対する内部拘束応力による低減の度合について差異が生じることが原因と考えられる。

A	B	C 高強度	D 普通
		1-6	2-6

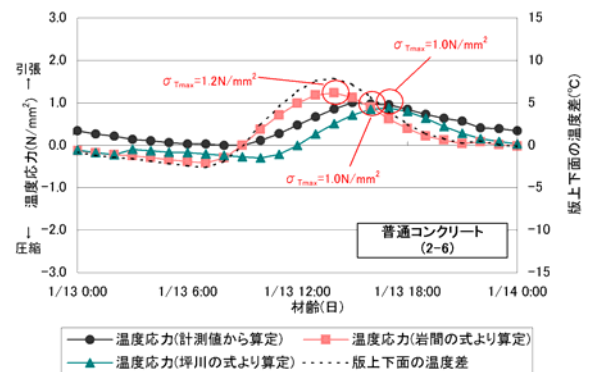
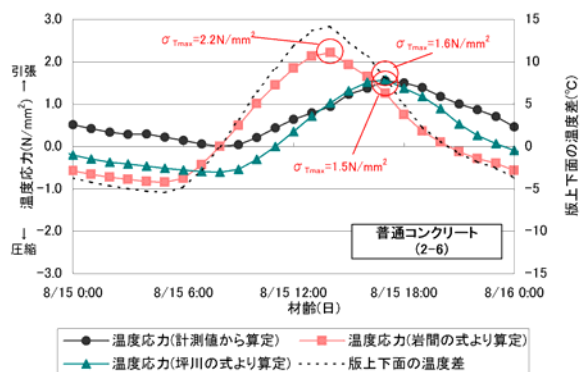
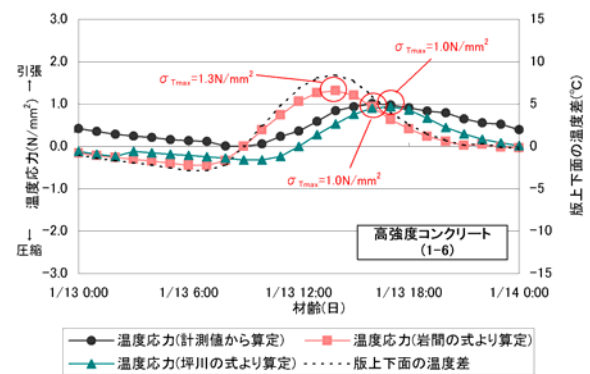
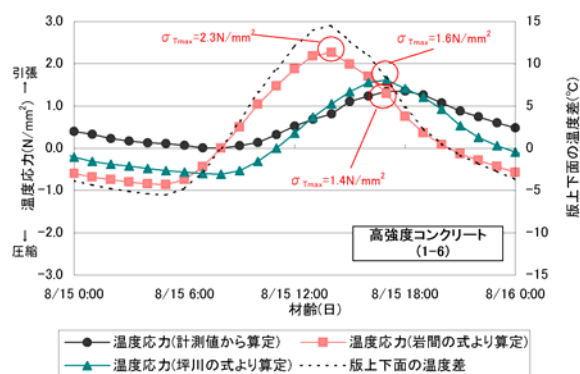


図 2-19 版中央部（計測位置 1-6, 2-6）における計測結果と岩間・坪川の温度応力算定式から算定した温度応力の比較（左：夏期・右：冬期）

2.5. おわりに

本章では、実際にコンクリート舗装版に生じる温度応力について検証するため、厚さ 46cm の実大規模のコンクリート舗装版に対して、1 年間に渡り実施したひずみ・温度計測データから算定された温度応力についてその挙動を整理した。また、その温度応力と現状の提案式から算定された温度応力を比較することにより、現状の提案式の問題点を確認・抽出した。その結果、以下のことが確認された。

- ・ 2.3.4, 2.4.1, 2.4.3(1)において示したように、コンクリート舗装版内の温度・ひずみ、およびそれらから算定される温度応力について、コンクリートの配合の違いによる差異はないことが確認された。したがって、コンクリート舗装版の温度応力を算定する際には、コンクリートの配合の影響を考慮しなくてもよいことが明らかとなった。
- ・ 2.4.1において示したように、今回計測結果から整理された版上下面温度差発生頻度は、現行の手法において示されているものとは異なることが確認された。したがって、対象とするコンクリート舗装版の版厚・気象条件を考慮したコンクリート舗装版温度を算定することが合理的な舗装設計を行ううえで必要であると考えられる。
- ・ 2.4.2, 2.4.3(1)において示したように、既往の研究において指摘されてきたとおり、曲げ拘束応力と内部拘束応力の位相差は存在し、曲げ拘束応力が卓越する温度上昇期には、内部拘束応力は圧縮応力として作用するため、曲げ拘束応力と内部拘束応力の足し合わせとして表現される温度応力は曲げ拘束応力よりも小さくなることが確認された。
- ・ 2.4.3(2)において示したように、今回版厚 46cm のコンクリート舗装版に対する計測結果から算定された最大温度応力は、岩間の式に対しては 50%程度小さい値を示し、坪川の提案式に対してはほぼ同程度の値となることが確認された。
- ・ ただし、コンクリート舗装版が曝される気象条件によりその温度分布特性が異なるため、最大温度応力のみに着目して導出した岩間の提案式・坪川の提案式における曲げ拘束応力に対する内部拘束応力の低減度合についても、差異が生じることが確認された。したがって、対象とするコンクリート舗装版の気象条件を考慮したコンクリート舗装版温度分布、およびそれを反映した温度応力を算定することが合理的な舗装設計を行ううえで必要であると考えられる。

以上より、次章以降において、コンクリート舗装版の版厚・気象条件を考慮した温度分布および温度応力を評価する手法を確立する。まず、3 章において、熱伝導解析を行い、コンクリート舗装版内の温度分布を理論的に算定し、その温度分布特性について検証する。

参考文献

- [1]岩間滋：コンクリート舗装の構造設計に関する実験的研究，土木学会論文集 111 号，1964
- [2]Westergaard,H.M.：Analysis of Stresses in Concrete Roads Caused by Variation of Temperature, Proceedings of t the annual meeting, Highway Research Board, pp.201-215, 1926
- [3]坪川将丈，水上純一，江崎徹，八谷好高：空港コンクリート舗装の温度応力に関する研究，国土技術政策総合研究所資料，No.341，2006
- [4]国土交通省国土技術政策総合研究所・新東京国際空港公団・社団法人セメント協会：共同研究報告書 空港舗装への高強度コンクリート適用に関する研究，2003
- [5]国土交通省国土技術政策総合研究所：空港コンクリート舗装の温度応力に関する研究，国土技術政策総合研究所資料 No.3
- [6]社団法人 日本道路協会：舗装設計便覧，2006
- [7]（財）港湾空港建設技術サービスセンター：空港舗装設計要領及び設計例，平成 20 年 7 月
- [8]坪川将文，水上純一，八谷好高，亀田昭一：日温度変化による空港コンクリート舗装の温度応力に関する研究，土木学会舗装工学論文集，第 12 巻，pp.157-164，2007

3. コンクリート舗装版の温度分布特性

3.1. はじめに

2章においては、版厚 46cm のコンクリート舗装版に対する版内のひずみ・温度計測結果より温度応力を算定した。しかし、前述したように版厚および気象条件により、版内の温度分布も変化することから温度応力も異なると考えられる。このことから、様々な版厚・気象条件に曝されるコンクリート舗装版の温度分布および温度応力を適切に評価するためには、まずはその温度分布を精度良く算定し、その温度分布特性を把握することが重要となる。

しかし、コンクリート舗装版の温度分布特性に着目した調査もしくは研究はあまり行われておらず、実態も明確でない。また、舗装設計に取り組むためには、理論解析による検討が必要となるが、そのような検討についてもあまり行われていないのが実状である。特に、温度分布の非線形性が温度応力に及ぼす影響は大きく、その適切な評価が求められる。また、舗装温度は、舗装が曝される気象条件の変化の影響を受け、日々変化するのみでなく、年間を通して大きく変動する。したがって、コンクリート舗装版が位置する場所での気象条件を考慮して、舗装温度を精度良く推測することが必要となる。

したがって、本章では、熱伝導解析によりコンクリート舗装版内の温度分布を算定し、熱伝導解析手法の適用性の確認、およびコンクリート舗装版内の温度分布特性の検証を実施する。また 4 章においては、この熱伝導解析により算定されたコンクリート舗装版内温度分布を用いて、3DFEM による温度応力の算定を実施する。

ここで、舗装版の温度を予測するためには、図 3-1 に示すように大気中の各種の熱エネルギーの流れを考慮し、舗装表面の熱収支を考えなければならない^{[1][2]}。熱エネルギーの流れを発生させる直接の原因は太陽の放射(日射)である^[3]。地球上で平均すると 342W/m^2 であり、日射量と大気上面の日射量とほぼ等しく、地表面に到達する日射量より大きい。これらの数字は地球全体として平均的な値であり、観測地点、季節変動、日変化、天候により異なる。気象に関連する因子は全天日射量、大気放射量、温度、相対湿度、風速、舗装に関連する因子としてはアルベド、射出率、熱容量、熱伝導率などが挙げられる^[4]。舗装表面では複雑な熱収支が成立っている。前述したように、熱エネルギーの流れを発生させる直接の原因は太陽から直接あるいは間接的に届く日射であるが、大気中には浮遊するエアゾル・水滴等も熱を有しており、これらからも熱が放射される。これが赤外放射、または長波放射である。また、舗装表面からも熱が放射されるが、これも赤外放射である。つまり、舗装表面では太陽から舗装表面への下向き日射と舗装表面で天空に向け反射する上向き日射、および天空から舗装表面への下向きの赤外放射と舗装表面から天空への上向き赤外放射が存在する

^[5]。さらに、舗装表面と大気の間では温度差があるため対流熱伝達が生じるが、これが顕熱輸送量である。また、舗装表面に水分があると蒸発し、同時に舗装表面から気化熱を奪う。これが潜熱輸送量である。

これらの熱収支を考慮した舗装温度を数値解析的に予測する研究は多く行われている^{[1][2][5]}，本研究においてもそれらの研究を参考に，コンクリート舗装版に対して検討を実施する。本章の概要をまとめた検討フロー図を図 3-2 に示す。

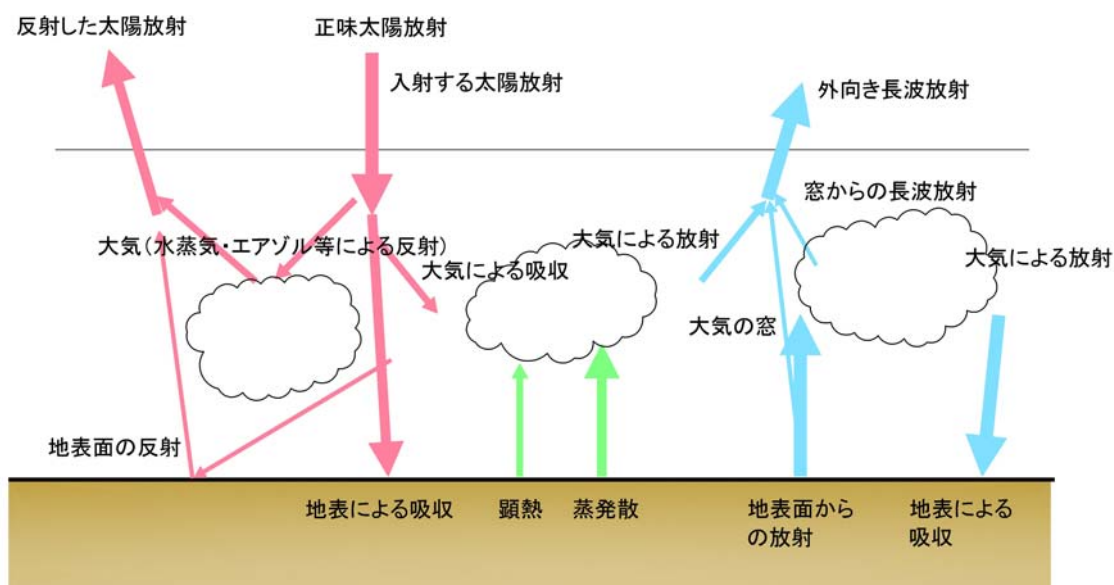


図 3-1 大気中の各種熱エネルギーの流れ

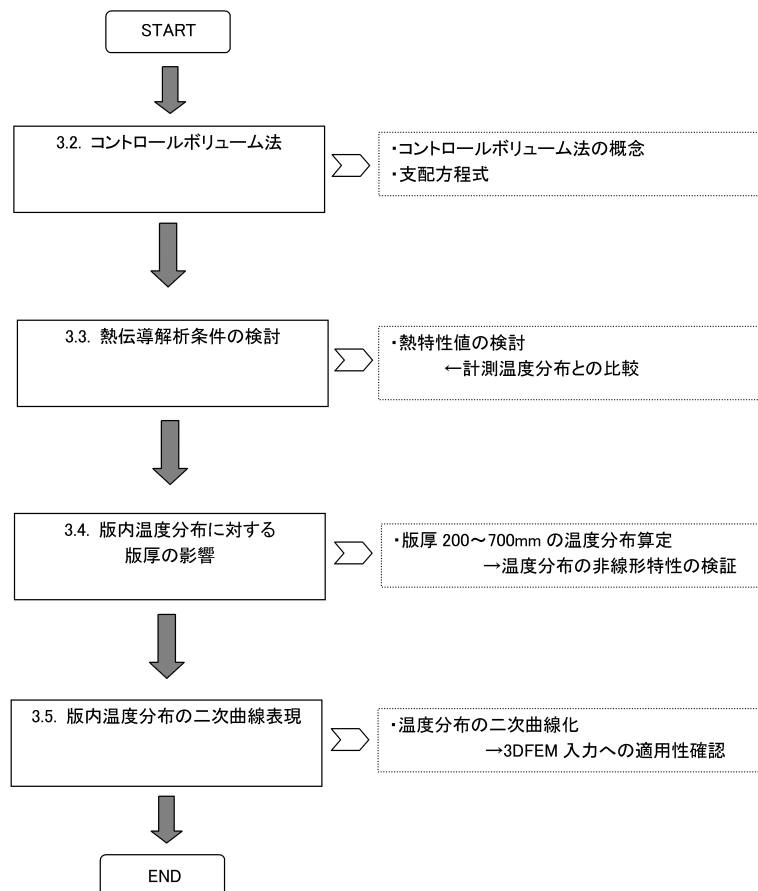


図 3-2 3章の概要

3.2. コントロールボリューム法

コンクリート舗装版の温度分布を算定するにあたり，差分法・有限要素法を用いることも可能であるが，本研究ではアルゴリズムが簡単で境界条件に柔軟に対応でき，解析精度も良いコントロールボリューム法^{[6][7]}を用いて熱伝導解析を行った。

この方法は，図 3-3 に示すように，着目している節点と隣接する節点の中央で切断した有限な厚さの層に流入・流出する熱エネルギーの収支が釣り合うという条件から以下に示すような支配方程式を誘導している^[5]。

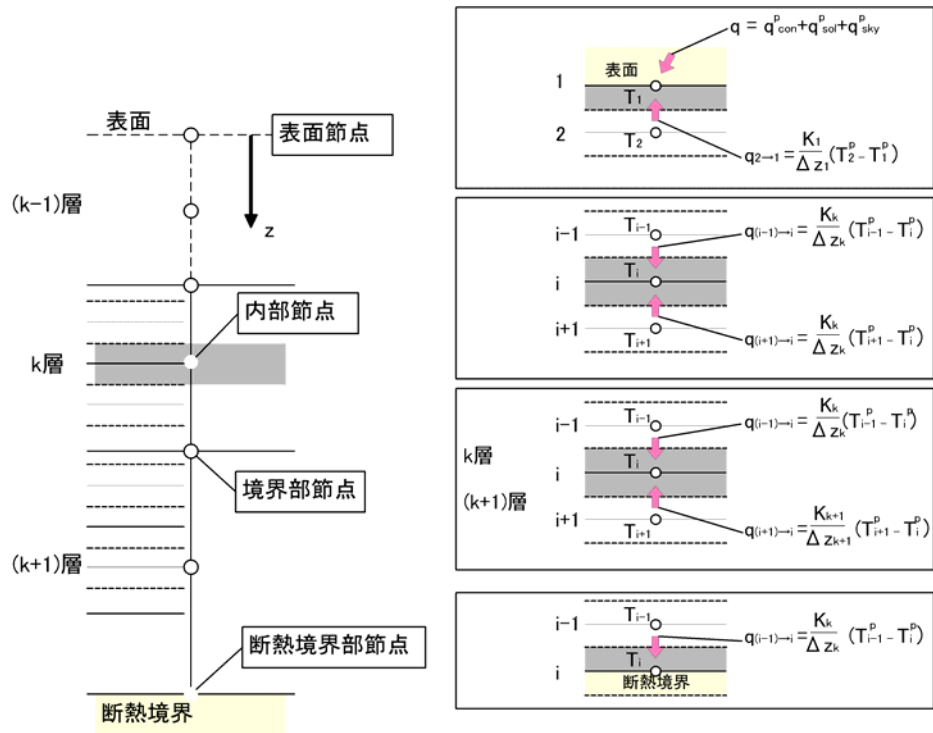


図 3-3 コントロールボリューム法の概念図

解析領域を図 3-3 のように $N-1$ 個の等間隔に分割する. 節点 1 と節点 N が境界上の節点である. このとき, 節点 2 から節点 $N-1$ は内部の節点であり, 任意の内部の節点 i における熱収支により,

$$\rho_k C_k \Delta z_k \frac{T_i^p - T_i^{p-1}}{\Delta t} = \frac{K_k}{\Delta z_k} (T_{i-1}^p - T_i^p) + \frac{K_k}{\Delta z_k} (T_{i+1}^p - T_i^p) \quad (\text{式 3-1})$$

が成立する. 上式を書き直すと,

$$-\frac{K_k}{\Delta z_k} T_{i-1}^p + \left(\frac{\rho_k C_k \Delta z_k}{\Delta t} + \frac{2K_k}{\Delta z_k} \right) T_i^p - \frac{K_k}{\Delta z_k} T_{i+1}^p = \frac{\rho_k C_k \Delta z_k}{\Delta t} T_i^{p-1} \quad (\text{式 3-2})$$

ここに,

K : 熱伝導係数

ρC : 熱容量 (ρ : 密度, C : 比熱)

Δz : 節点間隔

Δt : 時間間隔

添え字 k : k 番目の層

T_i^p : 節点 i における時間 t_p のときの温度

境界条件として節点 1 で温度 T_1^p が既知であるとき, 節点 2 における熱収支により,

$$\left(\frac{\rho_k C_k \Delta z_k}{\Delta t} + \frac{2K_k}{\Delta z_k} \right) T_2^p - \frac{K_k}{\Delta z_k} T_3^p = \frac{\rho_k C_k \Delta z_k}{\Delta t} T_2^{p-1} + \frac{K_k}{\Delta z_k} T_1^p \quad (\text{式 3-3})$$

また、同様に節点 N で温度が既知のとき、節点 N-1 の熱収支より、

$$-\frac{K_k}{\Delta z_k} T_{N-2}^p + \left(\frac{\rho_k C_k \Delta z_k}{\Delta t} + \frac{2K_k}{\Delta z_k} \right) T_{N-1}^p = \frac{\rho_k C_k \Delta z_k}{\Delta t} T_i^{p-1} + \frac{K_k}{\Delta z_k} T_N^p \quad (\text{式 3-4})$$

境界条件として節点 N で熱流速 q_N^p が与えられているとき、

$$\rho_k C_k \left(\frac{\Delta z_k}{2} \right) \frac{T_N^p - T_N^{p-1}}{\Delta t} = \frac{K_k}{\Delta z_k} (T_{N-1}^p - T_N^p) + q_{\text{cov}} + q_{\text{sol}} + q_{\text{sky}} + q_{\text{lat}} \quad (\text{式 3-5})$$

ここに、

q_{cov} : 顕熱輸送量

q_{sol} : 正味全天日射量

q_{sky} : 正味長波放射量

q_{lat} : 潜熱輸送量

であり、各々以下のように表すことができる。

$$q_{\text{cov}} = h(T_{\text{air}}^p - T_1^p) \quad (\text{式 3-6})$$

$$q_{\text{sol}} = (1 - \alpha) S_0^p \quad (\text{式 3-7})$$

$$q_{\text{sky}} = \sigma \varepsilon (T_{\text{sky}}^{p^4} - T_i^{p^4}) \quad (\text{式 3-8})$$

ここに、

h : 対流熱伝達係数

T_{air} : 気温

α : アルベド

S_0 : 全天日射量

σ : ステファン・ボルツマン定数($=5.67 \times 10^{-8} (\text{W}=(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4))$)

ε : 舗装表面の射出率

T_{sky} : 天空温度

対流熱伝達係数 h については、AustralianStandard の式： $h=3.1+4.1v$ (v : 風速(m/s))を本検討では用いることとした。上式を整理すると、

$$\begin{aligned} & -\left(\frac{K_k}{\Delta z_k} \right) T_{i-1}^p + \left\{ \frac{\rho_k C_k}{\Delta t} \left(\frac{\Delta z_k}{2} \right) + \frac{K_k}{\Delta z_k} + h \right\} T_i^p \\ & = \frac{\rho_k C_k}{\Delta t} \left(\frac{\Delta z_k}{2} \right) T_i^{p-1} + h T_{\text{air}}^p + q_{\text{sol}} + q_{\text{sky}} + q_{\text{lat}} \end{aligned} \quad (\text{式 3-9})$$

k 層と (k+1) 層の境界上の節点における熱収支より,

$$\begin{aligned} & \frac{\rho_k C_k}{\Delta t} \left(\frac{\Delta z_k}{2} \right) (T_i^p - T_i^{p-1}) + \frac{\rho_{k+1} C_{k+1}}{\Delta t} \left(\frac{\Delta z_{k+1}}{2} \right) (T_i^p - T_i^{p-1}) \\ &= \frac{K_k}{\Delta z_k} (T_{i-1}^p - T_i^p) + \frac{K_{k+1}}{\Delta z_{k+1}} (T_{i+1}^p - T_i^p) \end{aligned} \quad (\text{式 3-10})$$

上式を整理すると、次式のようになる。

$$\begin{aligned} & - \left(\frac{K_k}{\Delta z_k} \right) T_{i-1}^p + \left\{ \frac{\rho_k C_k}{\Delta t} \left(\frac{\Delta z_k}{2} \right) + \frac{\rho_{k+1} C_{k+1}}{\Delta t} \left(\frac{\Delta z_{k+1}}{2} \right) + \left(\frac{K_k}{\Delta z_k} + \frac{K_{k+1}}{\Delta z_{k+1}} \right) \right\} T_i^p - \left(\frac{K_{k+1}}{\Delta z_{k+1}} \right) T_{i+1}^p \\ &= \left\{ \frac{\rho_k C_k}{\Delta t} \left(\frac{\Delta z_k}{2} \right) + \frac{\rho_{k+1} C_{k+1}}{\Delta t} \left(\frac{\Delta z_{k+1}}{2} \right) \right\} T_i^{p-1} \end{aligned} \quad (\text{式 3-11})$$

3.3. 熱特性値

舗装版の温度分布は、比熱・熱伝達率・密度等の熱特性値に依存する。したがって、熱伝導解析を行ううえで、比熱・熱伝導率等の熱特性値を設定する必要がある。アスファルト層・下層路盤・路床については既往の研究を参考に設定した。コンクリート層の熱特性値については、熱伝導解析を行い、2.3.4 に示す計測値と比較することにより熱特性値の推定を行った。また、コンクリート層の熱特性値を推定するにあたってのコンクリート舗装版表面の境界条件は、計測されたコンクリート舗装版の表面温度を入力した。なお、初期値としては、計測開始時の表面温度が深さ方向に一定であると仮定し入力したが、後述する温度分布データの整理にあたっては初期値の影響を受けない時点からのデータを使用した。熱伝導解析を行う際の舗装構成は、2.3.4 に示すひずみ・温度分布を計測したコンクリート舗装版と同様のものとした。

表 3-1 に各層の層厚・熱特性値を、図 3-4 にこれらの条件に基づいて熱伝導解析を行い算定されたコンクリート舗装版内温度分布の計測値との比較結果を示す。一例として、各季節における版上下面温度差が最小・最大となる 0 時・15 時および 6 時・12 時の結果を示しているが、他の時刻・位置においても同様の結果となることを確認している。解析値は計測値を精度良く表現しており、同様の傾向を示している。夏期・冬期において版底面の誤差はあるものの、データ全体での計測値と解析値の相関関数は 0.99 であり、相関性は高いことを確認している。以降の検討においてはこれらの熱特性値を用いて、コンクリート舗装版の温度分布に対する検討を行うものとする。

表 3-1 各層の層厚・熱特性値

	コンクリート	アスファルト層	下層路盤	路床
層厚 (mm)	460	210	400	1600
密度 (kg/m ³)	2350	2350	1800	1800
比熱 (J/(kg・K))	1050	900	800	800
熱伝導係数 (W/(m・K))	4.0	0.7	0.5	0.5

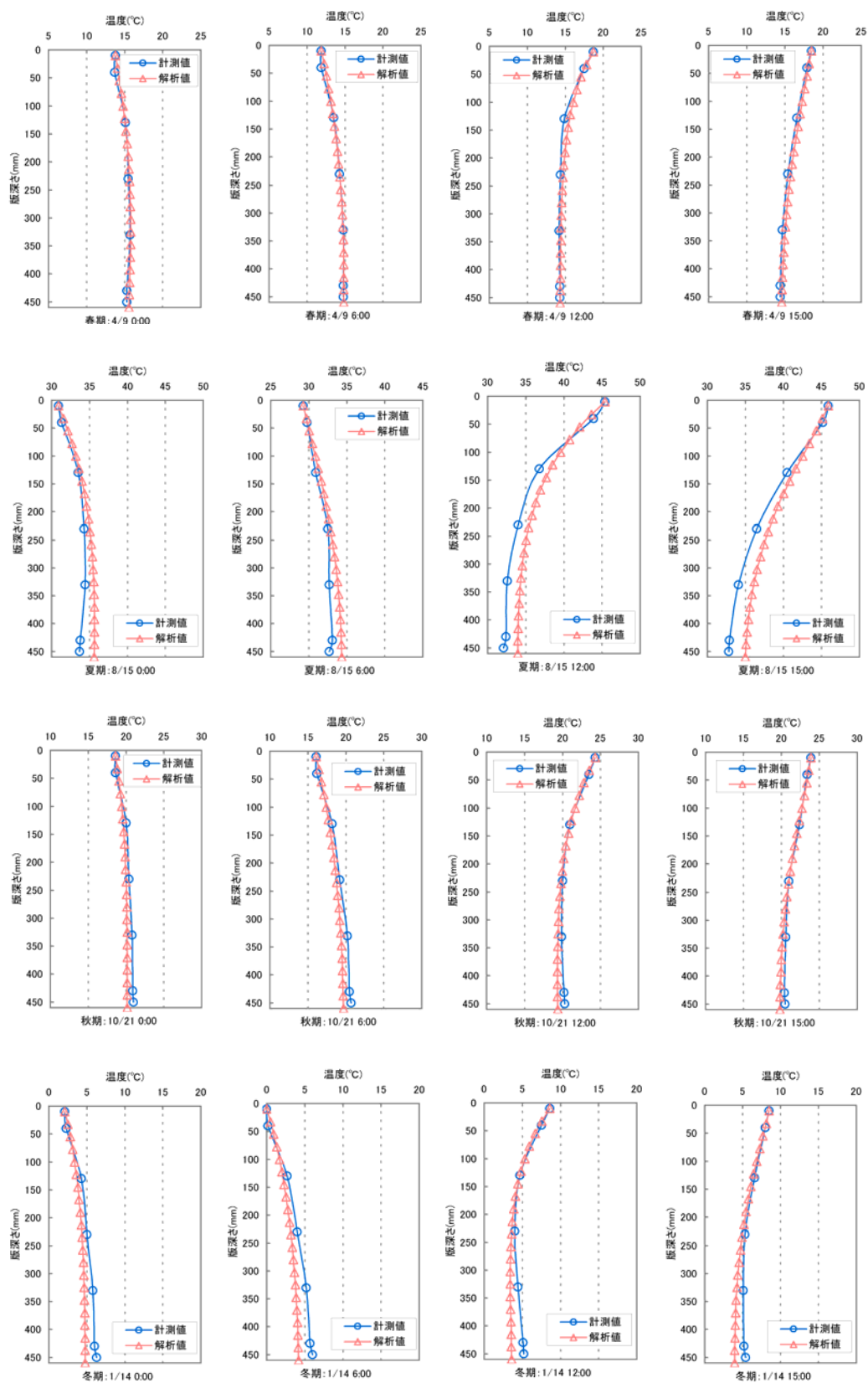


図 3-4 コンクリート舗装版内温度分布（計測値と解析値の比較）

3.4. 版内温度分布に対する版厚の影響

図 3-5 に熱伝導解析により算出された版厚 200～700mm の 0 時・8 時・14 時のコンクリート舗装版内温度分布（縦軸：深さを版厚で除して正規化した版深さ）を示す。気温が低い 0 時・8 時は負の版上下面温度差（版上面温度＜版下面温度）、気温の高い 14 時は正の版上下面温度差（版上面温度＞版下面温度）となる傾向を示している。また、各時刻の結果において、版厚に比例して非線形性が大きくなっていることが分かる。特に版上下面温度差が最も大きくなる 14 時の結果においては、版厚 400mm 以上で版上下面温度差は殆ど変化がないに関わらず、非線形性が強くなっていくことが確認された。

このように、版上下面温度差が同一で非線形性が強くなるということは、版下面において引張側に作用する曲げ拘束応力は同一である一方で、圧縮側に作用する内部拘束応力が大きくなるということである。したがって、非線形性が強くなる版厚 400mm 以上では、曲げ拘束応力に対する内部拘束応力による低減が大きくなり、曲げ拘束応力と内部拘束応力の和として与えられる温度応力は小さくなると考えられる。

また、気温が高くなる冬から夏にかけて、各版厚とも版上下面温度差が大きくなり、温度分布の非線形性、および非線形性の版厚毎の差異も大きくなることが分かる。気温が高くなる夜間(0 時)から昼間(14 時)にかけても、同様の傾向を示している。このように、気象条件によりコンクリート舗装版の温度分布特性は大きく異なることが確認された。

また、版上下面温度差が大きくなる 14:00 における版内温度分布について、縦軸を正規化した版深さではなく、実際の版深さとしたものを図 3-6 に示す。版厚 400mm 以上では、版内温度分布は一致していることが分かる。このことから、温度応力を算出する際に、コンクリート版厚 400mm 以上では、同様の版内温度分布を使用することが可能であると考えられる。

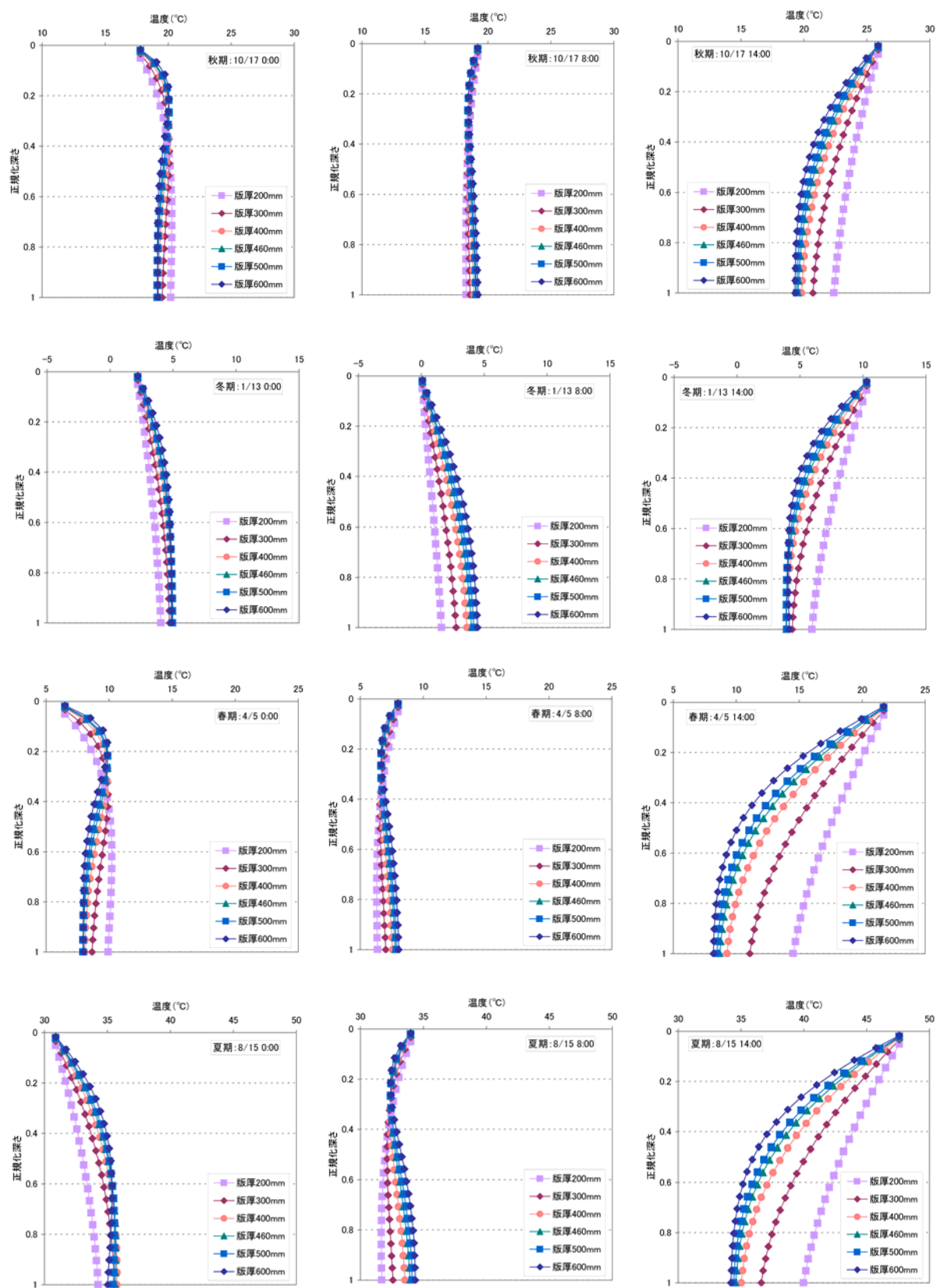


図 3-5 コンクリート舗装版内温度分布（縦軸：正規化した深さ）

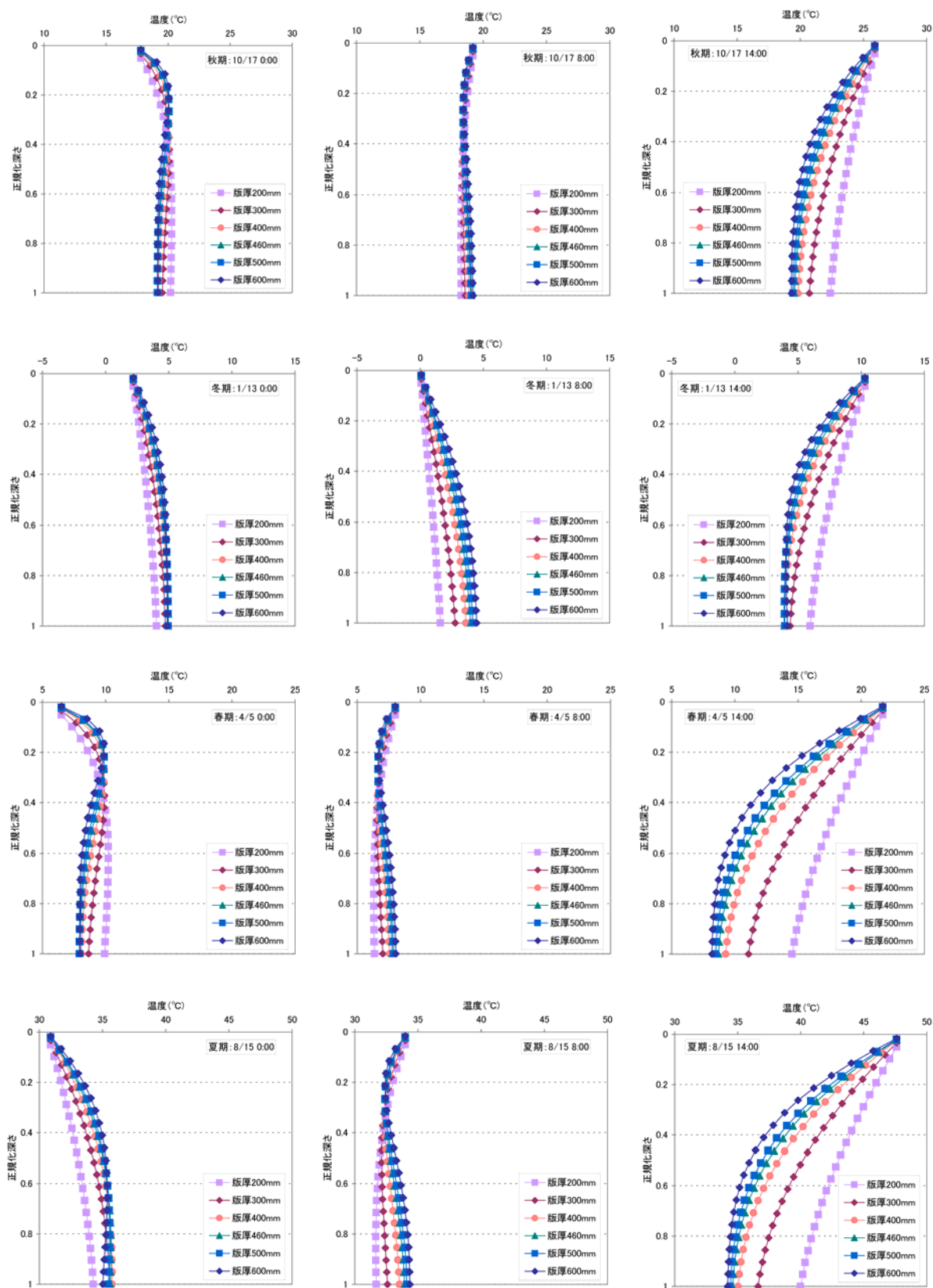


図 3-6 コンクリート舗装版内温度分布（縦軸：実際の版深さ）

3.5. 版内温度分布の二次曲線表現

4 章において実施する 3DFEM 解析では、体積積分でガウス点での温度を入力するため任意の点での温度を得る必要があり、版内の温度分布を二次曲線として表現しなければならない。そこで、熱伝導解析より得られた版内温度分布に対して下式に示すような二次曲線で近似可能かの検討を行った。

$$g(z) = b_0 + b_1 \cdot z + b_2 \cdot z^2 \quad (\text{式 3-12})$$

ここに、

$g(z)$: 版内温度分布

z : 版内深さ

b_i : 熱伝導解析から得られた版内温度分布より算定される各係数

図 3-7 に熱伝導解析結果と近似曲線を比較したものを示す。二次近似した曲線は精度良く解析結果をトレースしていることが分かる。このことから、熱伝導解析より得られた版内温度分布は二次曲線で近似可能であることが確認された。

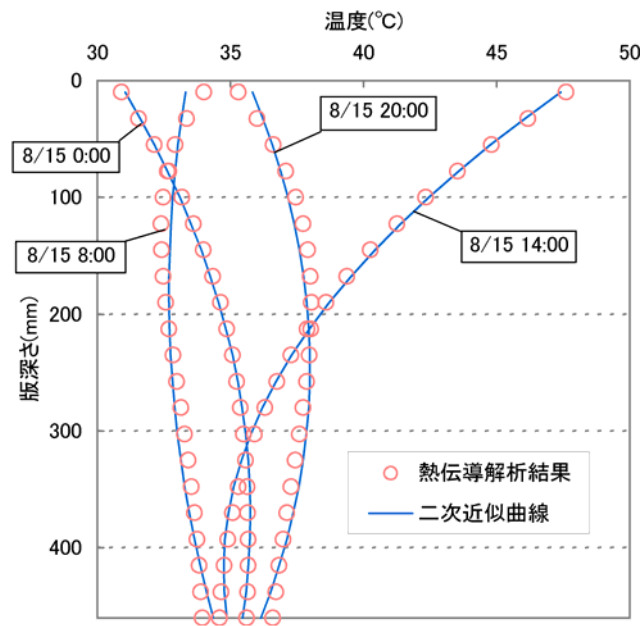


図 3-7 熱伝導解析結果と二次近似曲線の比較 (版厚 $t=460\text{mm}$)

3.6. おわりに

本章では、コンクリート舗装版の温度分布について熱伝導解析を行い理論的に算定する手法の提案を行い、コンクリート舗装版の温度分布特性について検証を行った。その結果、以下のことが確認された。

- 3.3 において示したように、熱伝導解析により算定されたコンクリート舗装版の温度分布と、計測された温度分布について有意な差は無く、熱伝導解析による温度分布の算定手法の妥当性が確認された。
- 3.4 において示したように、コンクリート舗装版の温度分布特性について、版厚に比例して非線形性が大きくなることが確認された。特に版厚 400mm 以上では、版上下面温度差が同一であるに関わらず非線形性が大きくなる傾向にある。このことから、版厚 400mm 以上では、曲げ拘束応力に対する内部拘束応力の低減がより顕著になると考えられる。
- 3.4 において示したように、コンクリート舗装版の温度分布特性について、季節毎の変動のみならず日変動といった気象条件によっても、温度分布の非線形性は大きく異なることが確認された。これは、温度分布の非線形性により生じる内部拘束応力の曲げ拘束応力への低減度合が、気象条件によって異なることを示している。
- 3.4 において示したように、コンクリート舗装版の温度分布について、版厚 400mm 以上では版内温度分布は殆ど変化しないことが確認された。
- 3.5 において示したように、コンクリート舗装版の温度分布は 2 次近似曲線化が可能であることが確認された。

以上のように、本章では熱伝導解析による温度分布の算定手法を確立できたとともに、版内温度分布特性について詳細に検討を行い、その挙動を明確にすることができた。4 章では、本章で算定された温度分布を用いた 3DFEM 解析により理論的に温度応力を算定し、その検証を試みる。

参考文献

- [1]小沼幸訓, 吉中保, 藤波潔, 松井邦人: 舗装温度計測サイトの観測データを用いた大気放射モデルの検証, 土木学会舗装工学論文集, 第 11 巻, pp.59-66, 2006
- [2]福田裕子, 吉中保, 松井邦人: 数値シミュレーションに基づく密粒舗装および遮熱性舗装の表面温度予測システムの構築, 舗装, Vol.43, No.4, pp.3-8, 2008
- [3]Kiehl, J.T. and Trenberth, K.E. : Earth's annual global mean energy budget, Bulletin of American Meteorological Society, Vol.78, No.2, pp.197-208, 1997
- [4]近藤純正: 地表面に近い大気の科学-理解と応用-, 東京大学出版会
- [5]青木大介, 吉中保, 藤波潔, 井上武美, 松井邦人: 舗装の熱パラメータ推定に関する考察, 土木学会舗装工学論文集, 第 10 巻, pp.225-231, 2005
- [6]スハス V.パタンカー, 水谷幸夫, 香月正司: コンピュータによる熱移動の流れの数値解析, 1995
- [7]Incropera, F.P. and DeWitt, D.P. : Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 3rd edition, Wiley, 1990

4. 3DFEM による温度応力解析

4.1. はじめに

コンクリート舗装版は、比較的剛性の高いコンクリート版によって交通荷重を分散させて路盤以下に伝達する。このような構造的特質を考慮した構造解析を行うために、弾性路盤上の平板モデルが用いられてきた。このモデルにおいては、コンクリート版は弾性平板とされ、路盤以下はこの平板を支える機能のみがモデル化されている。代表的なモデルが Westergaard によって開発された Winkler 上の弾性平板モデル^[1]である。このモデルは扱いやすく、長い間コンクリート舗装版の標準モデルとして設計等に利用されてきた^{[2][3]}。しかしながら、この平板モデルには、路盤以下の構造を考慮できないこと、路盤の変形や応力に関する情報を与えないことなどの限界ある。特に、路盤の支持機能だけでなく、路盤自体の耐久性を問題にする場合には、路盤内の変形、応力解析が重要になってくる^[4]。路盤の取扱いについては平板モデルを拡張したいくつかのモデルが提案されているものの^[5]、路盤を平板要素に置き換えるなどの単純化が行われており、必ずしも路盤の変形状を正確に表現したものとはいえない^[6]。

一方で、近年のパソコンの進歩に伴い、大規模な数値解析が比較的簡単に行えるようになっていく。このような中で、海外においても舗装設計における 3 次元有限要素法(3DFEM)による数値解析の汎用性・有用性・将来性が強く提言されており^{[7][8][9]}、今後この種のツールが標準的なものとなってくる可能性は大きいと考えられる。そこで、舗装の構造解析に特化した 3DFEM プログラムパッケージが、西澤らによって開発されている(Pave3D)^[6]。このプログラムは、航空機荷重が作用した場合のコンクリート舗装版に発生する荷重応力のみならず、温度応力についても算定できるプログラムとなっている。

本研究では、このプログラムを用いて、3 章において算定したコンクリート舗装版内の温度分布を用いた 3DFEM により温度応力を算定する。3DFEM により温度応力を算定する場合、版内温度分布を入力し、任意の位置における温度応力を算定することが可能となる。したがって、熱伝導解析により算定した各時刻の版内温度分布を反映した温度応力、さらには版平面内のあらゆる位置での温度応力を適切に求めることができる。

本章では、従来は温度応力の算定手法について実験から導出された実験式のみしかなかったものに対して、3DFEM による温度応力解析といった理論的なアプローチを行い、その適用性を確認するとともに、温度応力の挙動について詳細な検証を実施する。さらに、現状の提案式と比較することで、現状の提案式の問題点に対して、3DFEM による温度応力解析が有用であることを確認する。

本章の概要を示した検討フロー図を図 4-1 に示す。

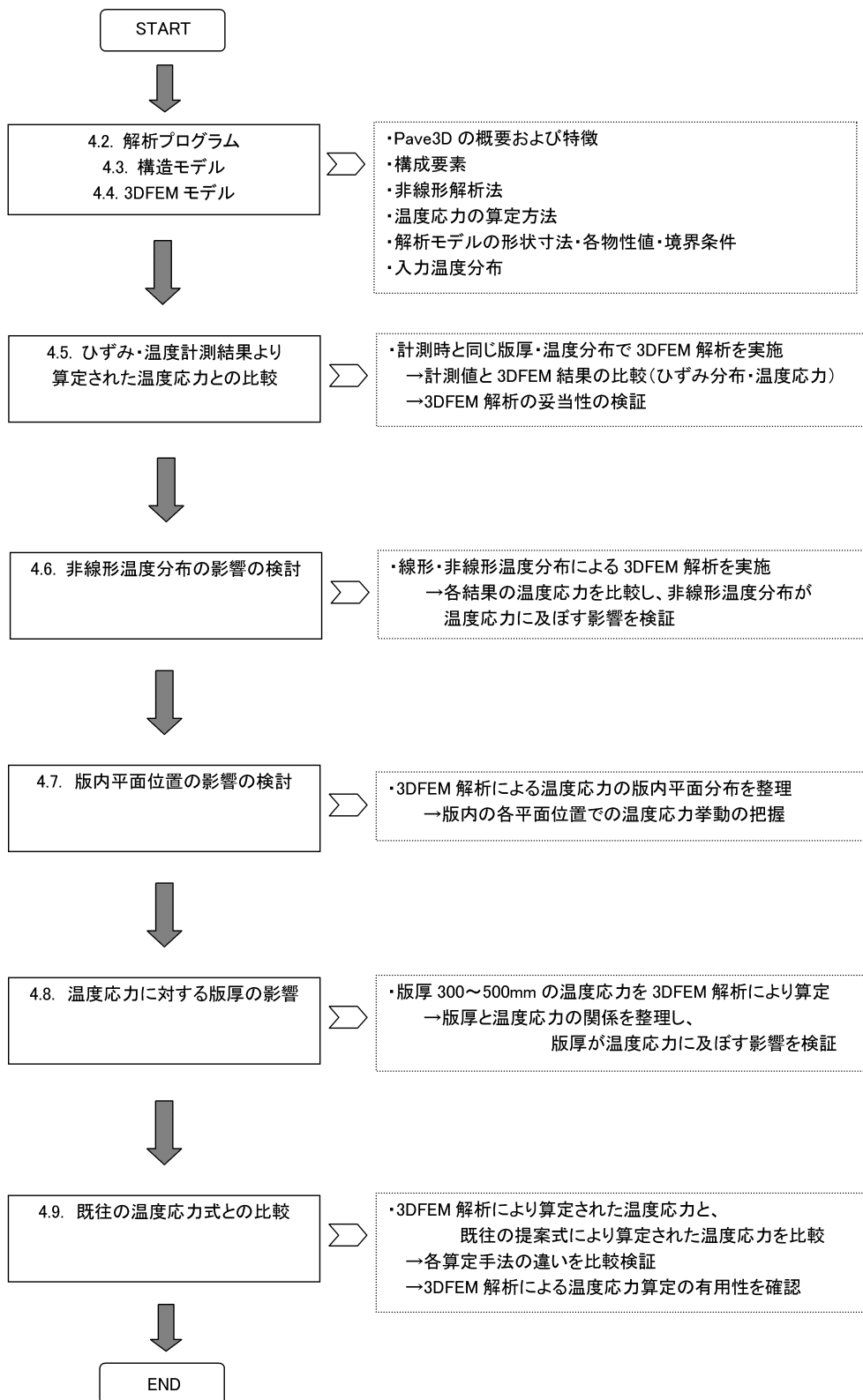


図 4-1 4 章の概要

4.2. 解析プログラム

前述したように、3DFEM は汎用性に優れ、コンクリート舗装、アスファルト舗装だけでなく、コンポジット系舗装も同様のモデルにより解析することが可能である^[6]。しかしながら、パソコンの技術発展に伴い、このような 3DFEM による数値解析は可能となったものの、入力・出力の膨大なデータに対する整理等のプリ・ポスト処理は多大な労力を有する。市販の 3DFEM ソフトはそのようなプリ・ポスト処理に対するプロセッサを用意しているが、多機能であるがゆえに作業の習熟に時間を要することに加えて、目地やひび割れ、コンクリート舗装版と路盤とのはがれなどの舗装に特有な現象を解析するためには、かなりの工夫を要する。

そこで、西澤らは舗装の構造解析に特化した 3DFEM (Pave3D) の開発を行った^[6]。このプログラムは、舗装特有の構造を効率良く解析することを目的に開発され、技術者が抵抗なく作業に取り組めるような簡便性を基本とし、フリーウェアとして公表されている。

4.3. 構造モデル

基本となる構造モデルは、コンクリート版、路盤、路床を図 4-2 に示すように 8 節点直方体ソリッド要素に分割し、目地や路盤とコンクリート版の境界面は汎用境界要素によってモデル化する。以下に構造モデルの詳細について記す^[6]。

4.3.1. 8 節点 6 面体要素

本研究では、8 節点 6 面体要素を採用した。各節点の変位から、要素内の任意の変位は以下のように計算できる^[10]。

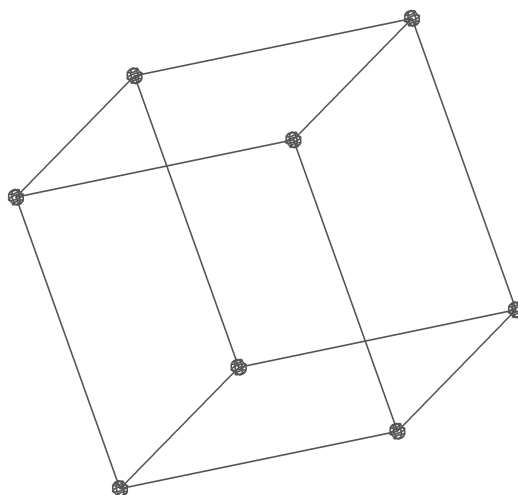


図 4-2 8 節点 6 面体要素

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \sum_{i=0}^7 \begin{bmatrix} N_i & 0 & 0 \\ 0 & N_i & 0 \\ 0 & 0 & N_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{Bmatrix} \quad (\text{式 4-1})$$

ここに,

u, v, w : 要素内の x, y, z 方向の変位

u_i, v_i, w_i : i 節点の x, y, z 方向の変位

$$N_i = \frac{1}{8} (1 + \xi_i \cdot \xi) (1 + \eta_i \cdot \eta) (1 + \zeta_i \cdot \zeta)$$

N_i は形状関数と呼ばれている．この形状関数の形から明らかなように，変位は要素内で 1 次関数となる．したがって，変位が高次の変化をするときには要素分割に注意しなければならない．

4.3.2. 境界面要素

気象条件によりコンクリート舗装版が反り変形した場合の，コンクリート版と路盤の接着状況や，目地やひび割れの荷重伝達機能を考慮するために，汎用境界面要素をこのプログラムでは用いている．図 4-3 に示すような 2 枚の面が接している状態を考える．

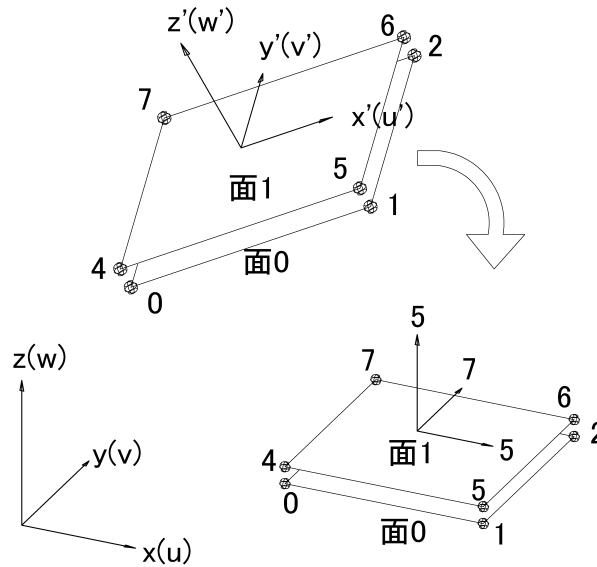


図 4-3 境界面要素

面 0 と面 1 における変位は各々，

$$\begin{Bmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{Bmatrix}_{\text{面}0} = \sum_{i=0}^3 \begin{bmatrix} N_i & 0 & 0 \\ 0 & N_i & 0 \\ 0 & 0 & N_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u'_i \\ v'_i \\ w'_i \end{Bmatrix} \quad (\text{式 4-2})$$

$$\{\delta'_0\} = \sum_{i=0}^3 \{N_i\} \{\delta'_i\} \quad (\text{式 4-3})$$

および,

$$\begin{Bmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{Bmatrix}_{\text{面}1} = \sum_{i=4}^7 \begin{bmatrix} N_i & 0 & 0 \\ 0 & N_i & 0 \\ 0 & 0 & N_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u'_i \\ v'_i \\ w'_i \end{Bmatrix} \quad (\text{式 4-4})$$

$$\{\delta'_1\} = \sum_{i=4}^7 \{N_i\} \{\delta'_i\} \quad (\text{式 4-5})$$

ここに,

u', v', w' : 要素内の x, y, z 方向の変位

u'_i, v'_i, w'_i : i 節点の x, y, z 方向の変位

面 0 から面 1 へ, 変位差に比例した力が伝達されたとする. すなわち,

$$\begin{Bmatrix} \Delta f'_x \\ \Delta f'_y \\ \Delta f'_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k'_x & 0 & 0 \\ 0 & k'_y & 0 \\ 0 & 0 & k'_z \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u' \\ \Delta v' \\ \Delta w' \end{Bmatrix} \quad (\text{式 4-6})$$

$$\{\Delta f'\} = [k'] \{\Delta \delta'\} \quad (\text{式 4-7})$$

ここに, k'_x, k'_y, k'_z は x', y', z' 方向のばね係数である. 一方, Δ は面 0 と面 1 の諸量の差であることを表す. 以上の式を用い, この要素に仮想仕事の原理を適用すると以下を得る.

$$\begin{Bmatrix} f'_0 \\ f'_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K'_{00} & -K'_{01} \\ -K'_{10} & K'_{11} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d'_0 \\ d'_1 \end{Bmatrix} \quad (\text{式 4-8})$$

$$\{f'\} = [K']\{d'\} \quad (\text{式 4-9})$$

ここに,

$$\{f'_0\} = \{f'_0 \quad f'_1 \quad f'_2 \quad f'_3\} \quad (\text{式 4-10})$$

$$\{f'_1\} = \{f'_4 \quad f'_5 \quad f'_6 \quad f'_7\} \quad (\text{式 4-11})$$

$$K'_{00} = \begin{bmatrix} k'_{00} & k'_{01} & k'_{02} & k'_{03} \\ k'_{10} & k'_{11} & k'_{12} & k'_{13} \\ k'_{20} & k'_{21} & k'_{22} & k'_{23} \\ k'_{30} & k'_{31} & k'_{32} & k'_{33} \end{bmatrix} \quad (\text{式 4-12})$$

$$K'_{01} = \begin{bmatrix} -k'_{04} & -k'_{05} & -k'_{06} & -k'_{07} \\ -k'_{14} & -k'_{15} & -k'_{16} & -k'_{17} \\ -k'_{24} & -k'_{25} & -k'_{26} & -k'_{27} \\ -k'_{34} & -k'_{35} & -k'_{36} & -k'_{37} \end{bmatrix} \quad (\text{式 4-13})$$

$$K'_{10} = K'_{01}{}^T \quad (\text{式 4-14})$$

$$K'_{11} = \begin{bmatrix} k'_{44} & k'_{45} & k'_{46} & k'_{47} \\ k'_{54} & k'_{55} & k'_{56} & k'_{57} \\ k'_{64} & k'_{65} & k'_{66} & k'_{67} \\ k'_{74} & k'_{75} & k'_{76} & k'_{77} \end{bmatrix} \quad (\text{式 4-15})$$

$$d'_0 = \{\delta'_0 \quad \delta'_1 \quad \delta'_2 \quad \delta'_3\} \quad (\text{式 4-16})$$

$$d'_1 = \{\delta'_4 \quad \delta'_5 \quad \delta'_6 \quad \delta'_7\} \quad (\text{式 4-17})$$

さらに,

$$k'_{ij} = \iint [N_i]^T [k'] [N_i] \|dA\| \quad (\text{式 4-18})$$

数値積分を用いると,

$$k'_{ij} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [N_i]^T [k'] [N_i] \|J\| d\xi d\eta \quad (\text{式 4-19})$$

ここに, $\|J\|$ は以下のベクトルの絶対値である.

$$J = \begin{Bmatrix} \partial x / \partial \xi \\ \partial y / \partial \xi \\ \partial z / \partial \xi \end{Bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \partial x / \partial \eta \\ \partial y / \partial \eta \\ \partial z / \partial \eta \end{Bmatrix} \quad (\text{式 4-20})$$

(式 4-20) は局所座標系での剛性マトリックスであるので, 全体座標系に変換する必要がある. そのためには, 局所座標系の方向余弦マトリックスを求めなければならない. そこで, 図 4-4 を参照して局所座標系を次のように定義する. まず, 節点 0 から節点 1 に向かう方向の単位ベクトルを $e_{x'}$ とし, 節点 0 から節点 2 に向かう単位ベクトルを a とすると, 面に垂直な軸の単位ベクトルは次のように定まる.

$$e_{z'} = \frac{e_{x'} \times a}{\|e_{x'} \times a\|} \quad (\text{式 4-21})$$

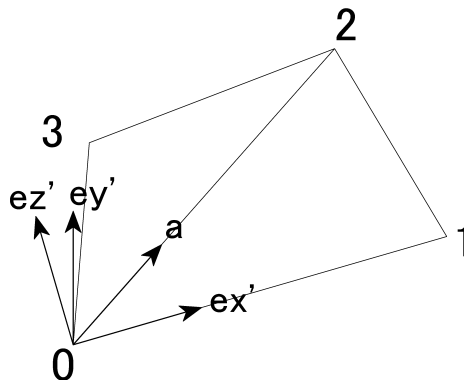


図 4-4 境界面要素の座標系単位ベクトルの定義

面内のもうひとつの軸は以下のように定まる．

$$e_{y'} = e_{z'} \times e_{x'} \quad (\text{式 4-22})$$

以上より，方向余弦マトリックス L は次のように定まる．

$$[L] = [e_{x'} \quad e_{y'} \quad e_{z'}]^T \quad (\text{式 4-23})$$

したがって，座標変換マトリックスは以下のように表される．

$$[T] = \begin{bmatrix} L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L \end{bmatrix} \quad (\text{式 4-24})$$

よって，全体座標系の構成マトリックスは以下のように表される．

$$[K] = [T]^T [K'] [T] \quad (\text{式 4-25})$$

4.3.3. ダウエルバーモデル

コンクリート舗装版の横目地は不連続面となり，構造的な弱点となりやすいため，横目地の荷重伝達を確保するための構造的な補強として，ダウエルバーが用いられる^[11]．解析的には，後述（5章参照）する9枚版モデルのように，隣接する版同士の荷重伝達を表現する際，ダウエルバーをモデル化する．3DFEMにおいては，ダウエルバーは目地の境界面要素の一部として取り扱われる．

図 4-5 は横目地におけるダウエルバーのモデル化の概念を示している^[12]．境界面要素の一部として取り扱われるダウエルバーの変位の表現には（式 4-1）に示す要素内座標系が用いられる．ダウエルバーは横目地を挟み，境界面要素の面を共有する2つのソリッド要素の中に埋め込まれている．ダウエルバーの目地幅の部分は3Dの梁要素で表現され，梁要素の両端部が2つのソリッド要素（ P ， Q ）と結合する．結合する箇所は，必ずしもソリッド要素の節点ではなく，内部の任意の場所と結合しているとし，この場所を内部節点として定義する．図 4-6 に示すように，これらの内部節点を， p と q としよう．あるソリッド要素 P の節点変位と，内部節点 p の位置座標から，形状関数により以下のように表される．

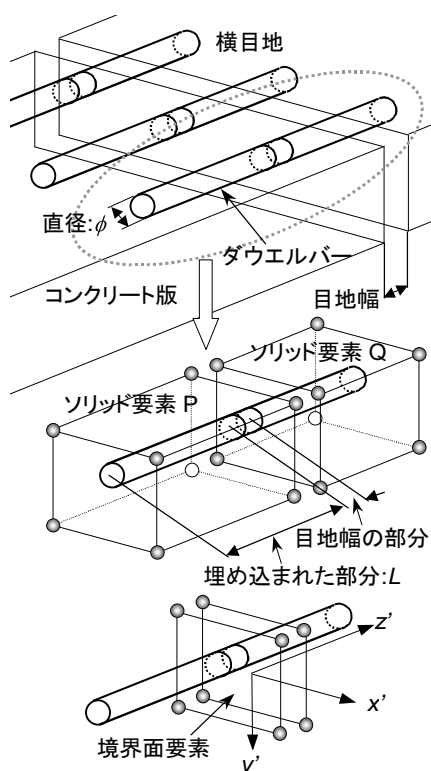


図 4-5 ダウエルバーのモデル化

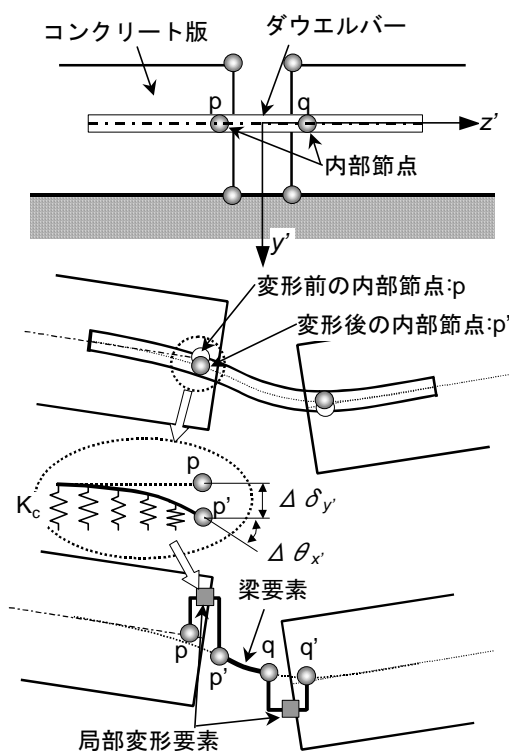


図 4-6 ダウエルバーとコンクリートの相互作用

$$\begin{Bmatrix} u' \\ v' \\ w' \\ \theta_{x'} \\ \theta_{y'} \\ \theta_{z'} \end{Bmatrix}_p = \sum_{i=0}^7 \begin{bmatrix} N_i & 0 & 0 \\ 0 & N_i & 0 \\ 0 & 0 & N_i \\ 0 & -\frac{\partial N_i}{\partial z'} & 0 \\ \frac{\partial N_i}{\partial z'} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_p \cdot \begin{Bmatrix} u_i' \\ v_i' \\ w_i' \end{Bmatrix}^P \quad \text{または} \quad \{d_p\} = [N_p] \cdot \{d^P\} \quad (\text{式 4-26})$$

ここに,

$\theta_{x'}, \theta_{y'}, \theta_{z'} : x', y', z'$ 軸に関する回転角

下添え字の p は内部節点, 上添え字の P はその内部節点の所属する要素の値であることを示す.

一方, この内部節点は, コンクリート版の変形後, 移動するが, ダウエルバーと周囲のコンクリートの相互作用による局部変形によって, ソリッド要素内の相互位置からややずれることになる. そのずれた内部節点を p' とする. 節点 p と p' の間に局部変形要素を挿入し, この要素によってダウエルバーと周囲のコンクリートの相互作用による局部変形を表現する. その相互作用を弾性支承上

の梁の厳密解で表現すると、以下のようになる。y'-z'平面内では、

$$\begin{Bmatrix} \Delta v' \\ \Delta \theta_{x'} \end{Bmatrix} = a_0 \begin{bmatrix} a_1 & -a_2 \\ -a_2 & a_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \Delta f_{y'} \\ \Delta m_{x'} \end{Bmatrix} \quad (\text{式 4-27})$$

ここに、

$$a_0 = \frac{2\beta^2}{k(S^2 - s^2)}$$

$$a_1 = \frac{1}{\beta}(SC - sc)$$

$$a_2 = (S^2 + s^2)$$

$$a_3 = 2\beta(SC + sc)$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K_c \phi}{4E_s I_s}}$$

K_c : ダウエルバーとコンクリートの相互作用を表すばね係数

ϕ : ダウエルバーの直径

$E_s I_s$: ダウエルバーのx'軸に関する曲げ剛性

$$s = \sin(\beta L)$$

$$c = \cos(\beta L)$$

$$S = \sinh(\beta L),$$

$$C = \cosh(\beta L)$$

L : コンクリートに埋め込まれたダウエルバーの長さ

$f_{y'}$: y'方向の力

$m_{x'}$: x'軸周りのモーメント

z'-x'平面内では、

$$\begin{Bmatrix} \Delta u' \\ \Delta \theta_{y'} \end{Bmatrix} = a_0 \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ a_2 & a_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \Delta f_{x'} \\ \Delta m_{y'} \end{Bmatrix} \quad (\text{式 4-28})$$

ここに、

$f_{x'}$: x' 方向の力

$m_{y'}$: y' 軸周りのモーメント

(式 4-27) および (式 4-28) を, 力についてまとめると以下ようになる.

$$\{\Delta f\} = [A^P] \{\Delta d\} \quad (\text{式 4-29})$$

ここに,

$$\begin{aligned} \{\Delta f\} &= \{f_p\} - \{f_{p'}\} \\ \{\Delta d\} &= \{d_p\} - \{d_{p'}\} \\ \{f\} &= \{f_{x'}, f_{y'}, f_{z'}, m_{x'}, m_{y'}, m_{z'}\}^t \\ \{d\} &= \{u', v', w', \theta_{x'}, \theta_{y'}, \theta_{z'}\}^t \end{aligned}$$

また, $[A^P]$ は 6 行 6 列の対称マトリクスとなり, その 0 以外の成分は以下ようになる.

$$A_{00}^P = A_{11}^P = a_4 a_3$$

$$A_{33}^P = A_{44}^P = a_4 a_1$$

$$A_{04}^P = -A_{13}^P = -a_4 a_2$$

$$a_4 = \frac{2\beta^2 E_s I_s}{C^2 + c^2}$$

仮想仕事の原理より, p - p' 節点間の局部変形要素に対する以下の剛性方程式を得る.

$$\begin{Bmatrix} f_p \\ f_{p'} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A^P & -A^P \\ -A^P & A^P \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} d_p \\ d_{p'} \end{Bmatrix} \quad (\text{式 4-30})$$

他方の q - q' 節点間についても同様のことがいえるので,

$$\begin{Bmatrix} f^q \\ f^{q'} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A^Q & -A^Q \\ -A^Q & A^Q \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} d^q \\ d^{q'} \end{Bmatrix} \quad (\text{式 4-31})$$

となる．ここで，添え字 q はソリッド要素 Q に埋め込まれた節点に対応する．また， p -' q ' 節点間には，3D の梁要素を挿入する^[13]．すなわち，

$$\begin{Bmatrix} f_{p'} \\ f_{q'} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{00} & S_{01} \\ S_{10} & S_{11} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} d_{p'} \\ d_{q'} \end{Bmatrix} \quad (\text{式 4-32})$$

以上より，ダウエルバー全体として以下のような剛性方程式が得られる．

$$\begin{Bmatrix} f_p \\ f_{p'} \\ f_{q'} \\ f_q \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A^P & -A^P & 0 & 0 \\ -A^P & A^P + S_{00} & S_{01} & 0 \\ 0 & S_{10} & A^Q + S_{11} & -A^Q \\ 0 & 0 & -A^Q & A^Q \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} d_p \\ d_{p'} \\ d_{q'} \\ d_q \end{Bmatrix} \quad (\text{式 4-33})$$

となる．ここで，

$$\begin{Bmatrix} f_{p'} \\ f_{q'} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (\text{式 4-34})$$

より，ソリッド要素の内部節点についての剛性マトリックスが得られる．

$$\begin{Bmatrix} f_p \\ f_q \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{00}^d & K_{01}^d \\ K_{10}^d & K_{11}^d \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} d_p \\ d_q \end{Bmatrix} \quad (\text{式 4-35})$$

ここに，

$$\begin{bmatrix} K_{00}^d & K_{01}^d \\ K_{10}^d & K_{11}^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^P & 0 \\ 0 & A^Q \end{bmatrix} \left[\begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} A^P + S_{00} & S_{01} \\ S_{10} & A^Q + S_{11} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A^P & 0 \\ 0 & A^Q \end{bmatrix} \right] \quad (\text{式 4-36})$$

また， $[I]$ は単位マトリックスである．一方，目地幅が非常に小さい場合には，目地の開きの部分の梁要素を取り去り，2 つの局部変形要素を直接結合する．このような場合のダウエルバーの剛性マトリックスは以下ようになる．

$$\begin{bmatrix} K_{00}^d & K_{01}^d \\ K_{10}^d & K_{11}^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^p & 0 \\ 0 & A^q \end{bmatrix} \left[\begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} A^p \cdot B \cdot A^p & A^p \cdot B \cdot A^q \\ A^q \cdot B \cdot A^p & A^q \cdot B \cdot A^q \end{bmatrix} \right] \quad (\text{式 4-37})$$

ここに,

$$[B] = [A^p + A^q]^{-1}$$

(式 4-36)や(式 4-37)は, (式 4-26)の関係より, 内部節点が属するソリッド要素の剛性方程式に変換される. すなわち,

$$\begin{Bmatrix} f^p \\ f^q \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N^p & 0 \\ 0 & N^q \end{bmatrix}^t \cdot \begin{bmatrix} K_{00}^d & K_{01}^d \\ K_{10}^d & K_{11}^d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} N^p & 0 \\ 0 & N^q \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} d^p \\ d^q \end{Bmatrix} \quad (\text{式 4-38})$$

ここに,

f^p, f^q : それぞれ p 節点, q 節点が属するソリッド要素の節点力ベクトル

d^p, d^q : それぞれ p 節点, q 節点が属するソリッド要素の節点力ベクトル

以上は, 境界面要素の座標系で定式化されているので, これを境界面要素の座標変換マトリックスを用いて, 全体座標系に変換する.

4.3.4. ばね係数

コンクリート舗装では, コンクリート版と路盤との接着を防ぐために, 路盤面では石粉を塗布する. したがって, コンクリート版と路盤とは分離していると考えられ, 温度差によるそり変形の際に, コンクリート版は路盤から浮き上がる. この現象を考慮するためにばね定数を以下のような変形の関数とした.

$$k = \begin{cases} k & (\Delta u < 0) \\ k \left(\cos \left(\frac{\Delta u \pi}{\Delta 0} \right) + 1.0 \right) / 2 & (0 < \Delta u < \Delta 0) \\ 0 & (\Delta 0 < \Delta u) \end{cases} \quad (\text{式 4-39})$$

ばね係数の値を急激に変化させると, 数値計算上不都合が生じるため, 遷移領域を設けている. $\Delta 0$ の値は経験的に 0.0001mm 程度とした.

4.3.5. 温度応力

このプログラムでは、各点における温度を与えて、温度応力を計算することができる^[14].

$$\{\sigma\} = [D](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_T\}) = [D]\{\varepsilon_c\} \quad (\text{式 4-40})$$

ここに、 $\{\sigma\}$: 応力ベクトル, $[D]$: 弾性マトリックス, $\{\varepsilon\}$: 全ひずみ, $\{\varepsilon_T\}$: 温度ひずみであり、以下のようなになる.

$$\{\varepsilon_T\} = \{\alpha T \quad \alpha T \quad \alpha T \quad 0 \quad 0 \quad 0\} \quad (\text{式 4-41})$$

ここに、 T はその点における温度である. 本研究においては、3章において、版内温度分布は二次曲線で近似可能であることが示されたため、 T を z の2次関数と仮定して3DFEMに入力し、温度ひずみを計算した.

4.3.6. FEM への定式化

構造体を与えられた物体力および境界条件のもとで釣り合っているとき、仮想仕事の原理により以下のような関係を得る.

$$\int_V \delta\{\varepsilon\}^T \{\sigma\} dV - \int_V \delta\{U\}^T \{F\} dV - \int_S \delta\{U\}^T \{T\} dS = 0 \quad (\text{式 4-42})$$

ここに、 $\{\sigma\}$ は応力ベクトル, $\{\varepsilon\}$ はひずみベクトル, $\{U\}$ は変位ベクトル, $\{F\}$ は単位体積当たりの物体力ベクトル, $\{T\}$ は単位面積当たりの表面力ベクトル, V は物体の体積, S は力学的境界条件が与えられている面積, $\delta\{\}$ は仮想変化量, $\{\}^T$ はベクトルの転置を表す.

ひずみベクトルは変位ベクトルから次のように求められる.

$$\{\varepsilon\} = [A]\{U\} \quad (\text{式 4-43})$$

ここに、 $[A]$ は、微分演算子を含むマトリックスである.

また、応力は以下のようなになる.

$$\{\sigma\} = [D](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_i\}) \quad (\text{式 4-44})$$

物体を要素分割したとき、要素内部の変位ベクトルは、節点変位ベクトル $\{d\}$ によって

$$\{U\} = [N]\{d\} \quad (\text{式 4-45})$$

と表されるところ。ここに、 $[N]$ は形状関数マトリックスと呼ばれている。(式 4-45)を(式 4-43)に代入すれば、

$$\{\varepsilon\} = [A][N]\{d\} = [B]\{d\} \quad (\text{式 4-46})$$

と表すことができる。ここに、 $[B]$ はひずみ-変位マトリックスという。(式 4-42)に(式 4-43)～(式 4-46)を代入すると、

$$\int_V \delta\{d\}^T [B]^T [D] ([B]\{d\} - \{\varepsilon_i\}) dV - \int_V \delta\{d\}^T [N]^T \{F\} dV - \int_S \delta\{d\}^T [N]^T \{T\} dS = 0 \quad (\text{式 4-47})$$

が得られる。(式 4-47)を整理すると、

$$\begin{aligned} & \delta\{d\}^T \int_V [B]^T [D] [B] dV \{d\} \\ &= \delta\{d\}^T \left(\int_S [N]^T \{T\} dS + \int_V [N]^T \{F\} dV + \int_V [B]^T [D] \{\varepsilon_i\} dV \right) \end{aligned} \quad (\text{式 4-48})$$

が得られる。 $\delta\{d\}$ は任意の仮想節点変位ベクトルであるから、(式 4-48)が成り立つためには、

$$\int_V [B]^T [D] [B] dV \{d\} = \int_S [N]^T \{T\} dS + \int_V [N]^T \{F\} dV + \int_V [B]^T [D] \{\varepsilon_i\} dV \quad (\text{式 4-49})$$

となる必要がある。したがって、

$$Kd = f_p + f_v + f_t \quad (\text{式 4-50})$$

となる．ここに， K は構造体の剛性マトリックス， d は節点変位ベクトル， f_p は表面荷重による節点荷重ベクトル， f_v は自重による節点荷重ベクトル， f_t は熱ひずみによる見かけの節点荷重ベクトルである．コンクリート舗装構造の場合，各層の要素と目地およびコンクリート版と路盤との境界面の相互作用を表す境界面要素による剛性マトリックスがあるので，

$$K = K_s + K_j \quad (\text{式 4-51})$$

と表される．したがって，本研究における 3DFEM の平衡方程式は以下ようになる．

$$(K_s + K_j)d = f_p + f_v + f_t \quad (\text{式 4-52})$$

ここに， K_s ：6 面体要素の剛性マトリックス， K_j ：境界面要素の剛性マトリックス， d ：節点変位ベクトル， f_p ：表面荷重ベクトル， f_v ：自重ベクトル， f_t ：温度荷重ベクトルである．

4.3.7. 非線形解析法

温度差による反り変形が生じるため，コンクリート舗装版は路盤から浮き上がる．そのため，境界面要素の剛性は浮き上がりの程度によって異なる，つまり変位の関数になるため，(式 4-52)は非線形な方程式となる．そこで，(式 4-52)を Newton-Raphson 法を用いて解くこととした．(i-1)段階の変位ベクトル d^{i-1} が既知とし，全体剛性方程式との残差

$$\Delta\phi = f_s + f_v + f_t - (K_s + K_j)d^{i-1} \quad (\text{式 4-53})$$

を計算し，次式によって変位ベクトルの修正項 Δd^i を計算する．

$$\Delta\phi = (K_s + K_j)\Delta d^i \quad (\text{式 4-54})$$

この修正項を既知の変位ベクトルに加えて再び残差を計算し，残差のノルムが十分小さい値になるまでこのプロセスを繰り返す．

4.4. 3DFEM モデル

図 4-7 に示すように、3DFEM 解析はひずみ・温度を計測したコンクリート舗装版と同様の形状・層構成とし、8.5m×8.5m のコンクリート舗装版の下に、210mm のアスファルト層、400mm の粒状路盤、1600mm の路床を考慮したモデルに対して実施した。ただし、解析モデルは、モデルの対称性を考慮し、平面的に 4 分割とした。コンクリート舗装版の厚さについては、ひずみ・温度を計測したコンクリート舗装版と同じ 460mm を基本とし、検討ケース毎に設定した。コンクリート層は非線形温度分布を考慮できるように、版深度方向に 6 個の層に分割した。

また、コンクリート層とアスファルト層の間には、4.3.2 で述べたような境界要素を入れ、コンクリート舗装版の反り変形についても考慮できるようにしている。アスファルト層・粒状路盤・路床については xy 方向に有限な広がりを持ち、境界条件として x, y 方向の変位は固定としている。また z 方向の境界条件についてはアスファルト層・粒状路盤は自由に変形するものとし、路床については底面を固定するものとした。またコンクリート層端部の境界条件として x, y, z 方向に自由に変形するものとしている。

3DFEM に入力する各層の物性値は、ひずみ・温度を計測したコンクリート舗装版施工時に実施した要素試験結果(2.3.3 参照)を基に設定している。各層の物性値を表 4-1 に示す。2 章に示したように、強度コンクリート(区画 1)及び普通コンクリート(区画 2)の各々に生じるひずみ・温度分布およびそれらから算定される温度応力には有意な差はないことから、本検討では高強度コンクリート(区画 1)の物性値により 3DFEM 解析を行うこととする。なお、以降の検討においても、解析において用いる物性値はこの高強度コンクリート(区画 1)のものをを用いている。

このモデルに、熱伝導解析より得られた各日時・各時刻の版内温度分布を二次曲線として近似したものを入力し、温度応力を算定する。

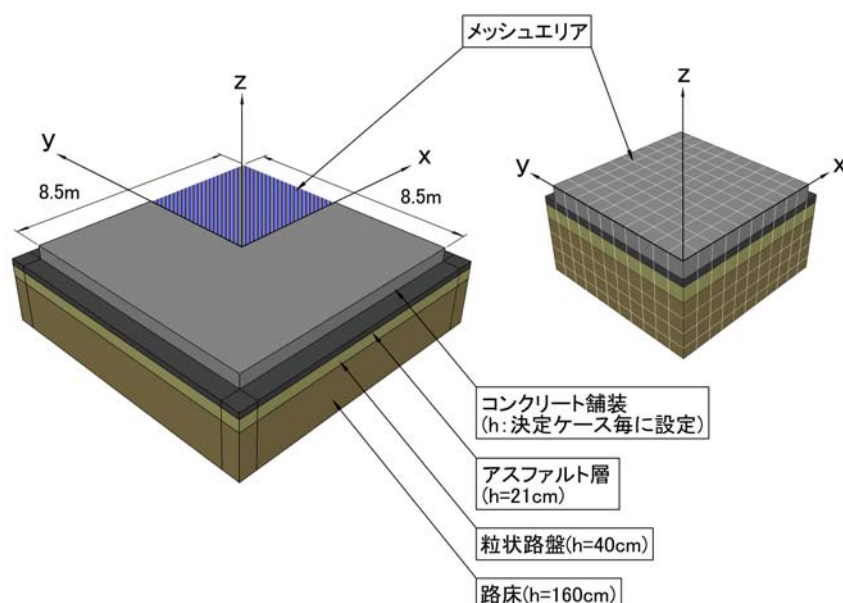


図 4-7 3DFEM モデル

表 4-1 各層の物性値

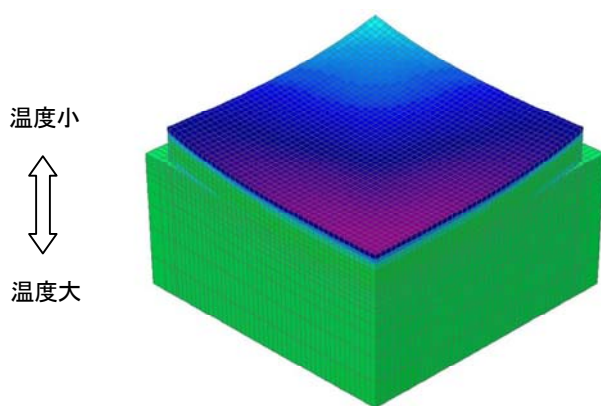
コンクリート層	
弾性係数 $[\text{N}/\text{mm}^2]$	39900
ポアソン比	0. 206
線膨張係数 $[/\text{°C}]$	0. 00000889
単位体積重量 $[\text{kN}/\text{m}^3]$	23. 5
厚さ $[\text{mm}]$	460
境界要素	
水平方向ばね定数 $[\text{N}/\text{mm}^2/\text{m}]$	0. 1
鉛直方向ばね定数 $[\text{N}/\text{mm}^2/\text{m}]$	10000
アスファルト層	
弾性係数 $[\text{N}/\text{mm}^2]$	2000
ポアソン比	0. 35
厚さ $[\text{mm}]$	210
粒状路盤	
弾性係数 $[\text{N}/\text{mm}^2]$	500
ポアソン比	0. 35
厚さ $[\text{mm}]$	400
路床	
弾性係数 $[\text{N}/\text{mm}^2]$	100
ポアソン比	0. 35
厚さ $[\text{mm}]$	1600

4. 5. ひずみ・温度計測結果より算定された温度応力との比較

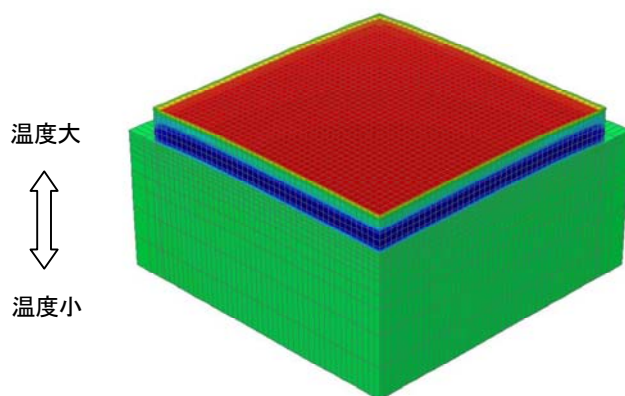
3DFEM の適用性を検証するため、2 章で求められたひずみ・温度計測結果より算定された温度応力と、3DFEM により算定された温度応力の比較を行った。3DFEM モデルにおいて、コンクリート舗装版の厚さは、ひずみ・温度計測時と同様の 460mm として解析を実施した。

4.5.1. コンクリート舗装版の変形について

計測結果に基づいた温度応力との比較の前に、3DFEMにより算定されるコンクリート舗装版の変形状態について述べる。早朝および昼間のコンクリート舗装版の変形状態を図 4-8 に示す。早朝においては、コンクリート舗装版の版上下面温度差は負(版上面温度<版下面温度)となり、版縁部および隅角部が反り上がるような変形となる。一方、昼においては、版上面温度差が正(版上面温度>版下面温度)となり、版中央部が反るような変形となる。しかし、版中央部の反りはコンクリート舗装版自体の自重により抑えられるため、版中央部の反り変形量は比較的小さい値となる。また、版に生じる応力については、版上下面温度差が負の場合は版表面：引張応力・版底面：圧縮応力となり、版上下面温度差が正の場合はその逆となる。



(a) 5:00 (版上下面温度差：負)



(b) 13:00 (版上下面温度差：正)

図 4-8 版内温度分布によるコンクリート舗装版の変形状態(3DFEM 解析結果)

4.5.2. 拘束ひずみ

ひずみ・温度計測結果から算定された拘束ひずみと、3DFEM から算定された拘束ひずみを比較した。図 4-9 に、一例として版上下面温度差が最小・最大となる冬期(1 月)・夏期(8 月)のある期間における、版中央部での版表面から 30mm・230mm・430mm の位置（2 章の長期計測におけるひずみ・温度の計測位置と同じ）における拘束ひずみの比較結果を示す。

1 月の結果においては、計測結果から算定された拘束ひずみと、3DFEM から算定された拘束ひずみはほぼ一致している。8 月の結果においては、版表面から 30mm の結果については、計測結果から算定された拘束ひずみと 3DFEM から算定された拘束ひずみはほぼ一致しているものの、版表面から 230mm および 430mm の位置における拘束ひずみは完全には一致していない。特に、版上下面温度差が大きくなる日中においては、3DFEM から算定された拘束ひずみの方が計測値から算定された拘束ひずみよりも大きくなっている。これは、3.3 に示すように、コンクリート舗装版の温度分布について、計測値と熱伝導解析結果が完全には一致していないことが一因と考えられる。

上記のように、計測値から算定された拘束ひずみと 3DFEM から算定された拘束ひずみは、温度分布の差異に起因する誤差はあるものの、両者の間で全体の傾向がよく一致していることが確認された。特に、版深度方向の位置によって異なる拘束ひずみの挙動が 3DFEM でも良く表現できていることが分かる。

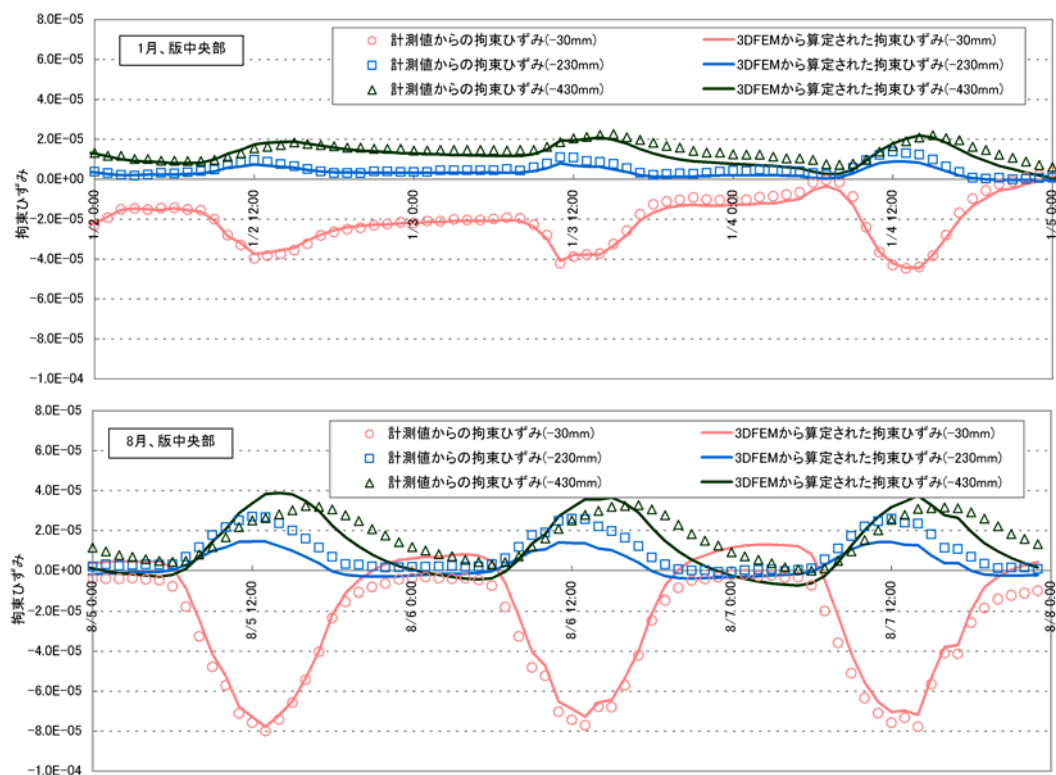


図 4-9 計測値から算定された拘束ひずみと 3DFEM から算定された拘束ひずみの比較

4.5.3. 温度応力

ひずみ・温度計測結果から算定された温度応力と、3DFEMにより算定された温度応力を比較した。図4-10に、一例として版上下面温度差が最小・最大となる冬期(1月)・夏期(8月)のある期間における、版中央部の版底面における温度応力の比較結果を示す。

1月の結果においては、計測結果から算定された温度応力と、3DFEMから算定された温度応力は、同様の挙動を示しているものの、完全には一致していない。また、8月の結果においても、同様に全体の挙動は似ているものの、3DFEMから算定された温度応力の方が、計測結果から算定された温度応力よりも概ね大きい値を示す傾向があることが確認できる。

特に、1月の結果において、図4-9に示すように、拘束ひずみは計測値と3DFEMとでほぼ一致しているにも関わらず、拘束ひずみに弾性係数を乗じることにより求まる温度応力は一致していない。これは、ひとつには、ひずみ・温度の計測値から温度応力を算定するにあたっての誤差が原因と考えられる。つまり、2.4.2における図2-13に示すように、3点のひずみの計測値から2次曲線で全体のひずみ分布を近似していることから誤差が生じやすく、加えて版底面位置での温度応力はそれらの外挿により算定するため、さらに誤差が生じ得ると考えられる。このように、ひずみ・温度の計測値から算定する温度応力自体が、様々な仮定に基づいているため、必ずしも正確ではない可能性がある。

このように、計測から算定された温度応力と3DFEMから算定された温度応力は完全に一致はしていないものの、全体として挙動は良く一致していることは確認された。さらに、前項で述べたように拘束ひずみは良く一致している。これらのことから、3DFEMの適用性は確認されたと考えられる。

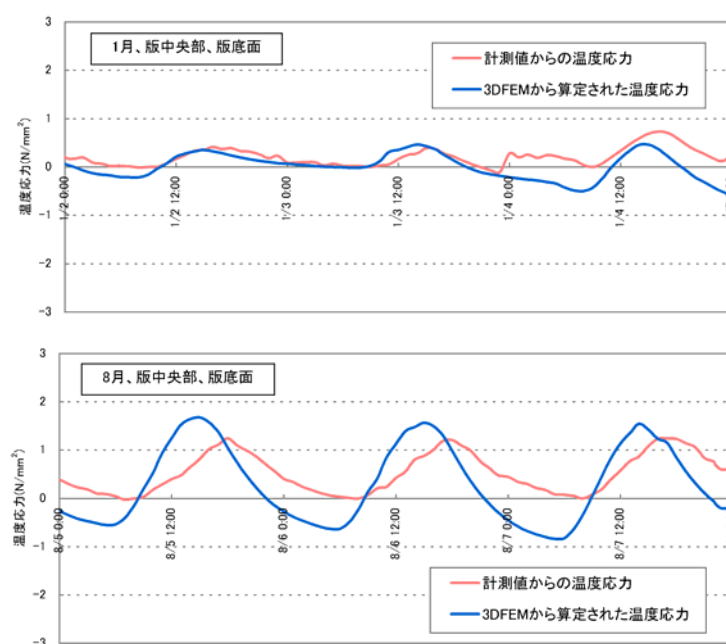


図 4-10 計測値から算定された温度応力と 3DFEM から算定された温度応力の比較

4.6. 非線形温度分布の影響の検討

ここでは、コンクリート舗装版の温度応力に及ぼす温度分布の影響を評価するため、非線形温度分布、つまり熱伝導解析より得られたそのままのコンクリート舗装版内温度分布を入力した場合と、版上下面温度を直線で結んだ線形温度分布を入力した場合のコンクリート舗装版に生じる温度応力の比較を行った。3DFEM 解析において、コンクリート舗装版の厚さは、300・400・460・500mm として、各版厚に対して温度応力解析を実施した。

図 4-11 に、各版厚のある日の 11:00 および 15:00 の版内温度分布(左側)およびその版内温度分布を入力し 3DFEM により算定した版内温度応力温度分布(右側)を示す。各々の結果について、非線形温度分布の場合(図中実線)と線形温度分布(図中点線)の場合を比較している。

上記 2 時刻において、図 4-11 左側に示される各版厚の版内温度分布のように、版上下面温度差は 1°C 程度しか変わらないため、版上下面温度差の 1 次式として表される岩間の提案式・坪川の提案式により版底面の温度応力を算定すれば温度応力は殆ど変わらないはずである。たしかに、図 4-11 右側に示される各版厚の版内温度応力分布における線形温度分布を入力した場合では版底面の温度応力は殆ど変わらない結果となっている。しかし、非線形温度分布、つまり熱伝導解析より得られたそのままのコンクリート舗装版内温度分布を入力した場合の版底面の温度応力は 11:00 および 15:00 で大きな差異がある。これは上記 2 時刻について、版上下面温度差は殆ど同一ではあるが、温度分布の非線形性が異なることにより生じたものと考えられる。すなわち、温度分布の非線形性の大きい 11:00 の温度応力解析結果は、内部拘束応力が大きく曲げ拘束応力が低減されるため、温度応力が 15:00 に比べて小さい結果となっている。

このように、空港コンクリート舗装版のように版厚が厚く、温度分布の非線形性が大きくなる場合には、版上下面温度差が同一であっても温度応力は異なる。つまり、版上下面温度差のみからは温度応力を適切に算定することができないことが確認された。従来の温度応力算定式のように、温度分布の非線形性の影響を低減係数(曲げ拘束応力に対して、岩間の提案式は 0.7 倍^[15]、坪川の提案式は $-0.772h+0.854$ 倍^[16])を乗じて考慮するような手法であっても、版上下面温度差の 1 次式として温度応力を算定する限りは、適切でないことが分かる。

また、2 章でも述べたように、版上下面温度差のみから線形温度分布とした場合は、版内温度分布を非線形とした場合と比べて、版底面に生じる温度応力を過大に評価していることが、この 3DFEM による温度応力解析結果からも確認された。

図 4-12 に 3DFEM により算定された版中央部の版表面・版底面の温度応力の 1 週間の変動について、非線形温度分布(図中赤線)および線形温度分布(図中青線)を入力した場合の比較結果を示す。全ての時刻において、版底面については、温度応力は非線形温度分布を入力した場合の方が線形温度分布の場合よりも小さい。一方で、版表面については、版底面とは逆に、温度応力は非線形温度分布を入力した場合の方が線形温度分布の場合よりも大きいことが確認された。

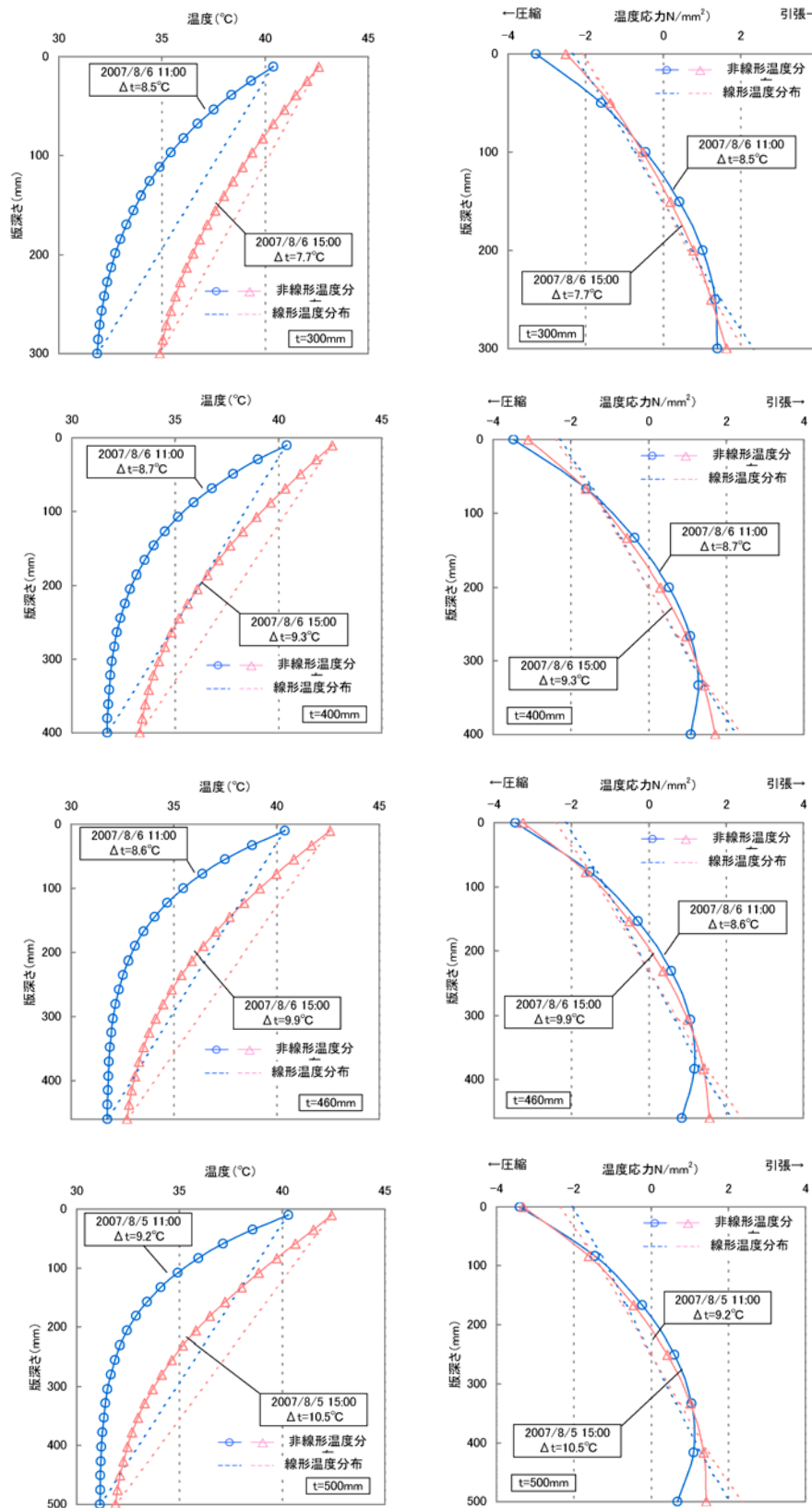


図 4-11 版中央部における温度応力比較その 1 (左：版内温度分布、右：版内温度応力分布)

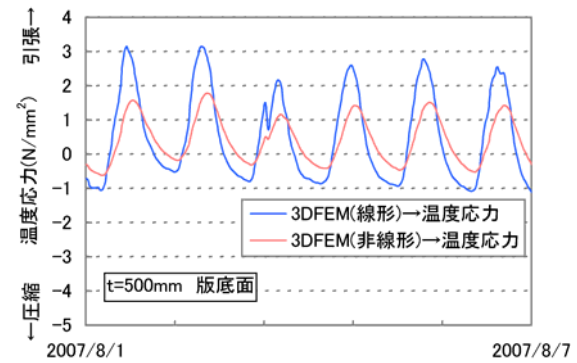
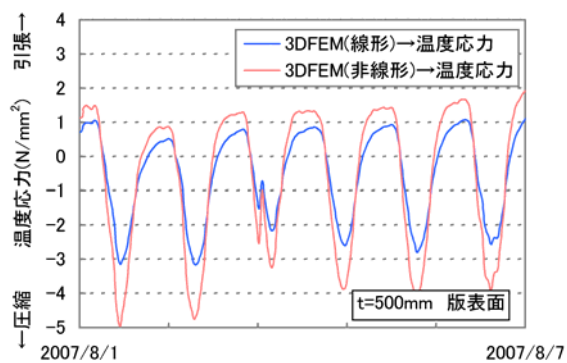
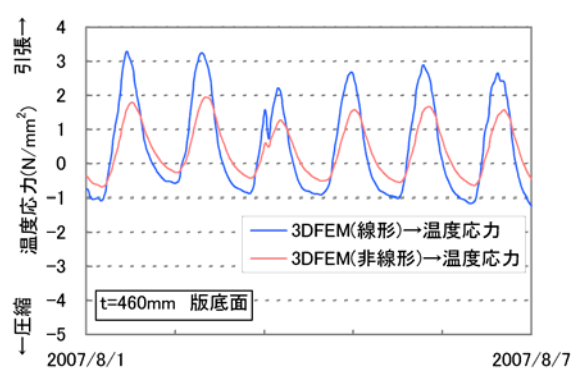
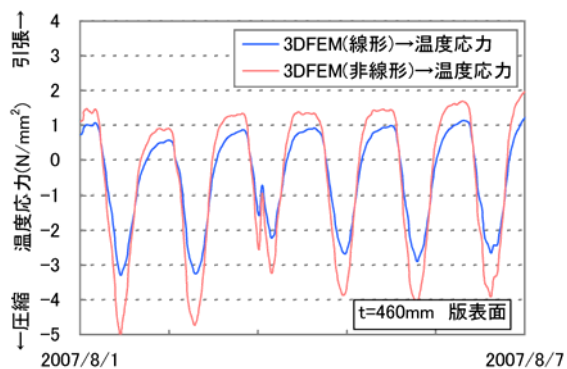
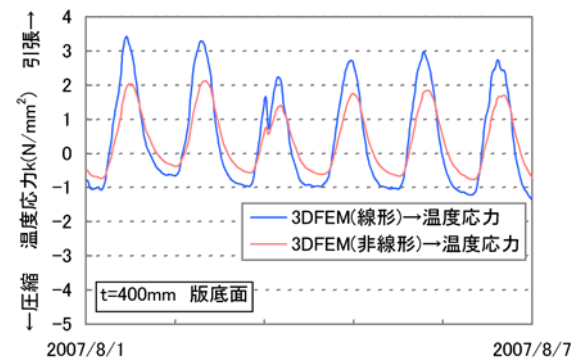
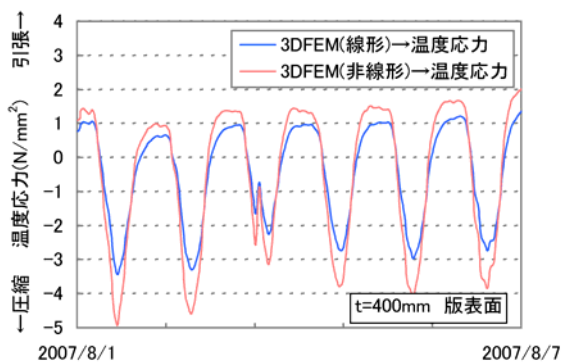
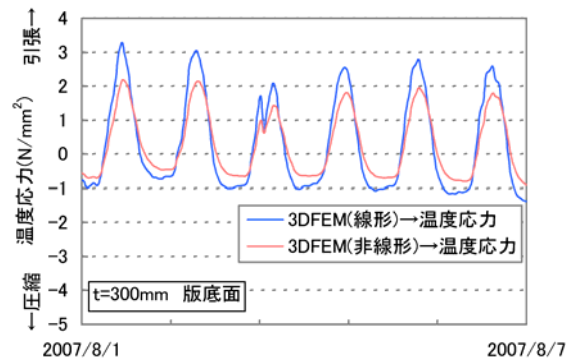
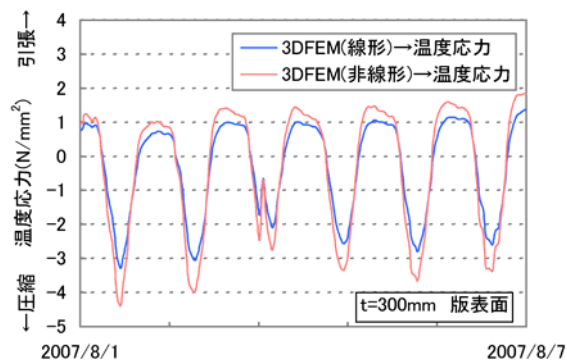


図 4-12 版中央部における温度応力の比較その 2 (左：版表面温度応力、右：版底面温度応力)

4.7. 版内平面位置の影響の検討

空港コンクリート舗装設計においては、疲労度を算定するにあたり、コンクリート舗装版を細分化し、各メッシュ毎に疲労度を算定する。そのため、航空機荷重が通過する任意の場所での温度応力を算定する必要がある。また、航空機荷重応力は、版中央部よりも版縁部において概ね最大となることが多いことから、版中央部のみでなく版縁部についても温度応力の挙動を適切に把握することが重要となると考えられる。

そこで、本項では、3DFEMにより算定されたコンクリート舗装版に生じる温度応力について、その版内平面位置の影響を検討した。

図 4-13 に 3DFEM により算定された版表面・版底面の温度応力の 1 週間の変動について、版中央部および版縁部を比較したものを示す。版厚 300mm・400mm・460mm・500mm の全ての結果において、版表面・版底面ともに、版中央部の温度応力の方が版縁部よりもわずかに大きくなる傾向を示す。

図 4-14 および図 4-15 は、版厚 300mm・400mm・460mm・500mm に対して算定した温度応力の、x 方向つまり版中央部から版縁部にかけての温度応力分布を示したものである。版表面の 0 時～6 時にかけての版内温度応力分布、および版底面の 10 時～16 時にかけての版内温度応力分布を示している。

版表面の温度応力については、外気温が低く、負の版上面温度差となる 0 時～6 時にかけて、x 方向・y 方向の応力ともに引張応力を示している。y 方向の応力が版内においてわずかに減少はしているもののほぼ一定値を示しているのに対し、x 方向の応力は版中央部から縁部にかけて顕著に減少していることが分かる。

版底面の温度応力については、版表面と同様に、y 方向の応力が版内においてわずかに減少はしているもののほぼ一定値を示しているのに対し、x 方向の応力は版中央部から縁部にかけて顕著に減少し、引張から圧縮に転じていることが分かる。また、x・y 方向の応力ともに、朝から昼に向かうにつれて大きく、昼から夕方に向かうにつれて小さくなっており、外気温の大きさ、つまり正の版上下免温度差に比例して温度応力が大きくなっている。

このように、版表面・版底面ともに版縁部においては、x 方向に比べて y 方向の温度応力が大きくなることが確認された。また、版表面と比較して、版底面は平面位置による温度応力の差異が極端に大きい。したがって、特に版底面については、温度応力に対する版内平面位置の影響を考慮する必要があることを示している。また、版厚によって、温度応力に対して版内平面位置が及ぼす影響は大きく変わらないことが確認された。

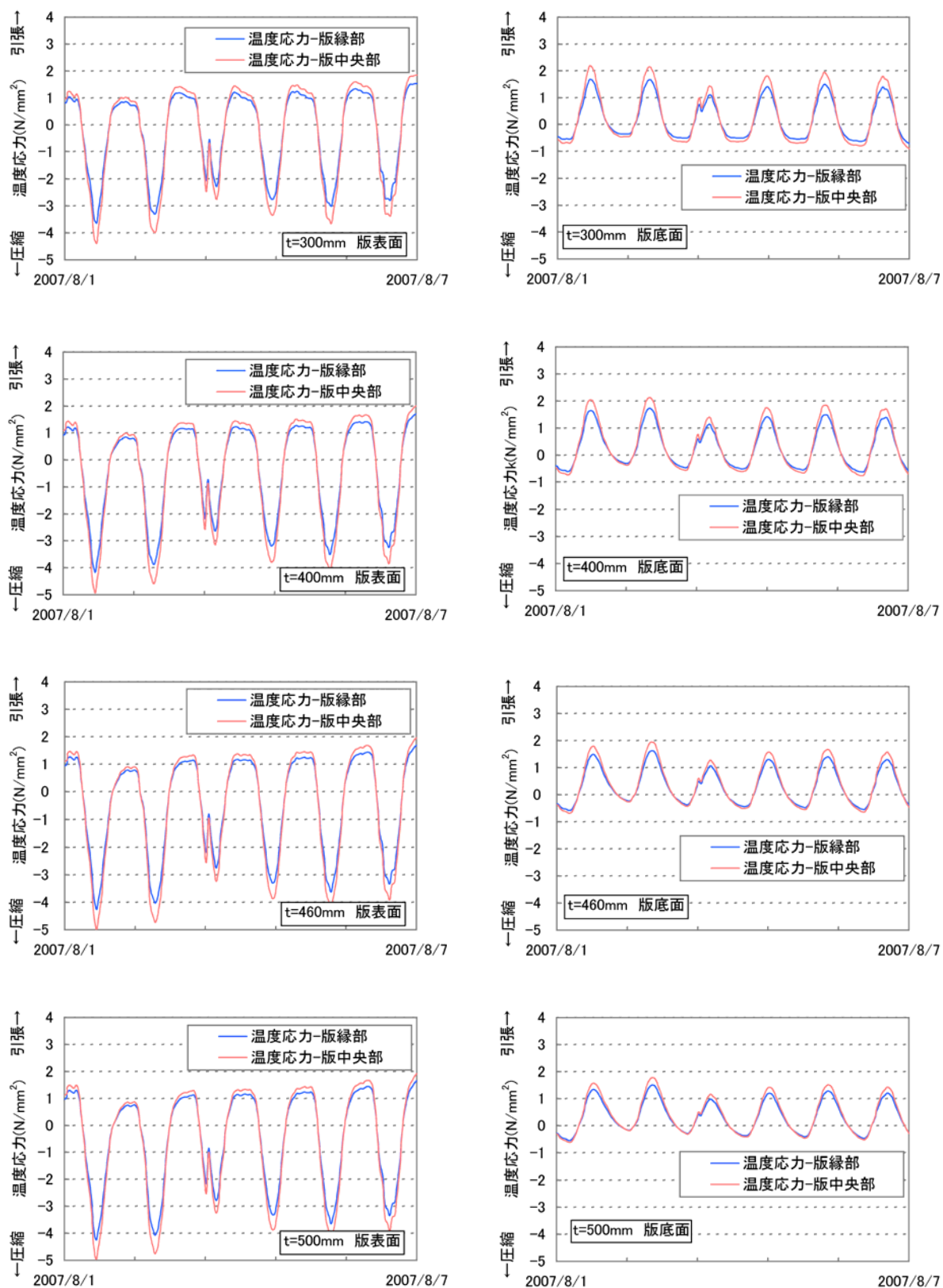


図 4-13 版中央部・縁部の温度応力の比較（左：版表面温度応力、右：版底面温度応力）

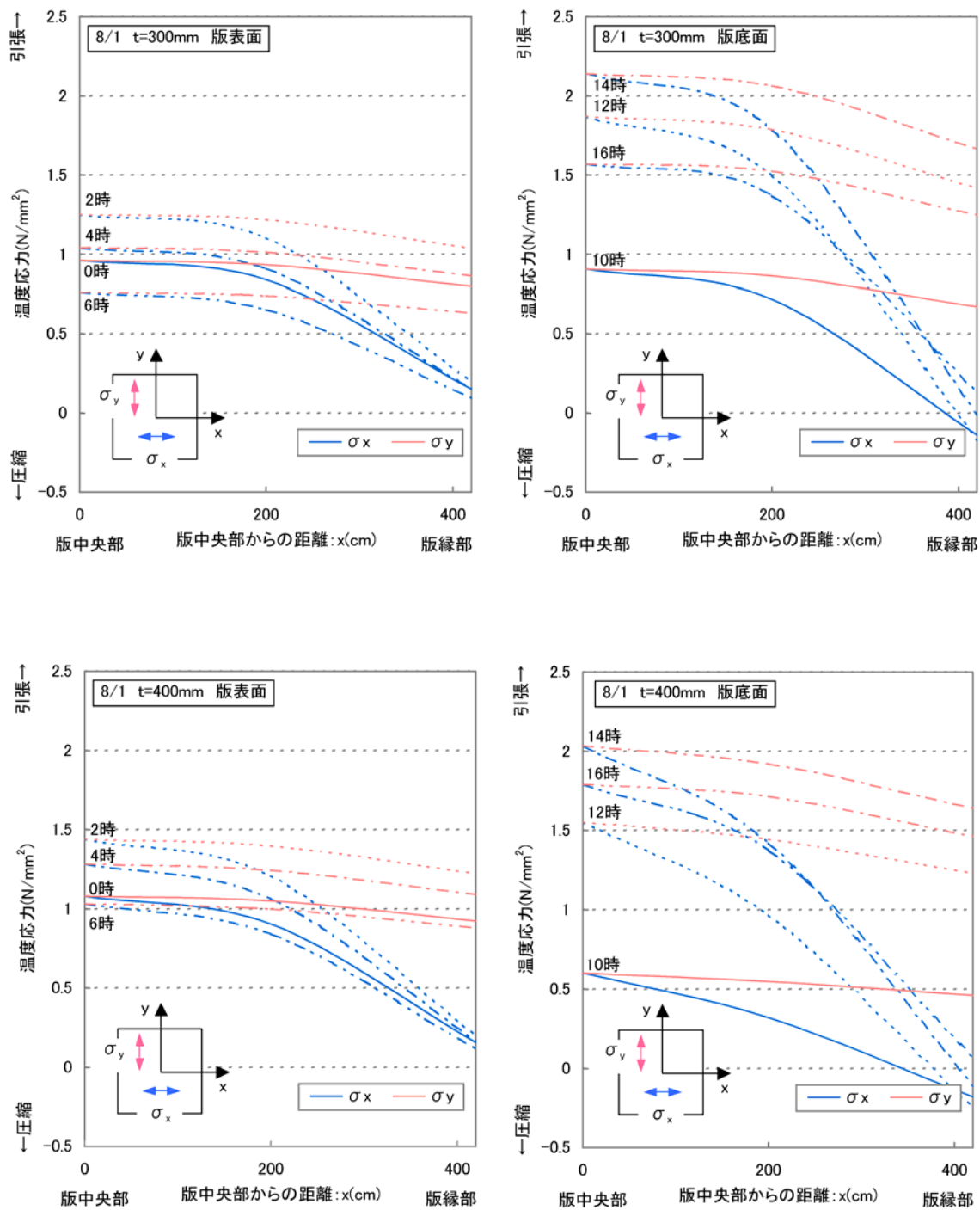


図 4-14 温度応力版内平面分布： $t=300\text{mm}$ 、 400mm （左：版表面、右：版底面）

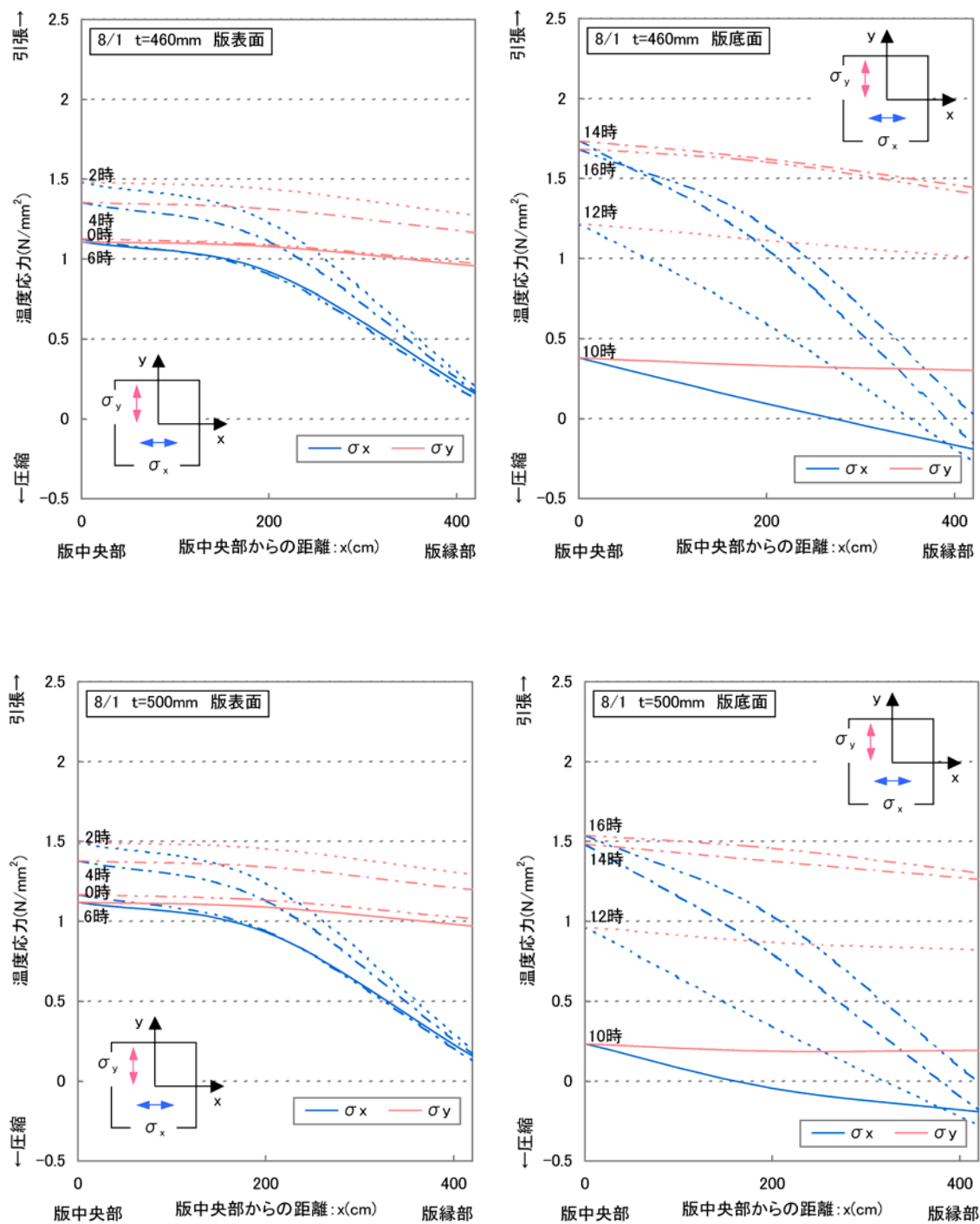


図 4-15 温度応力版内平面分布：t=460mm、500mm（左：版表面、右：版底面）

4.8. 温度応力に対する版厚の影響

様々な版厚のコンクリート舗装版に対して 3DFEM により温度応力を算定し、各結果を比較することで、版厚が温度応力に及ぼす影響について検討した。版厚 300mm・400mm・460mm・500mm に対して、3DFEM により温度応力を算定した。

図 4-16 は上記各版厚毎のコンクリート舗装版中央部および版縁部における、版底面温度応力の季節毎の日経時変化を比較したものである。版中央部・版縁部ともに、版厚が厚くなるほど、温度応力の最大値は小さくなる傾向を示す。これは前述したように、版厚が厚くなるほど版内温度分布の非線形性が大きくなることにより、圧縮応力として作用する内部拘束応力が大きくなり、曲げ拘束応力が低減されるためである。

このように、版厚が厚くなることで温度応力の最大値自体は小さくなるが、この傾向は外気温が大きい春・夏期に顕著であり、外気温が小さい秋・冬期においては温度応力に対する版厚の影響は比較的小さい。また、日経時変化の中でも、外気温が小さい時刻(0 時～6 時, 18 時～24 時)においては、版厚の影響は殆ど無く、版厚に関わらず温度応力は同様の挙動を示している。つまり、版厚が温度応力に及ぼす影響は外気温が大きい場合には顕著であるが、外気温が小さい場合にはそれほど顕著でないことを示している。これは、岩間の提案式・坪川の提案式のように[○]、版上下面温度差が最大となる日中の時刻における温度応力の最大値から、温度応力の算定式を推定した場合には表現できない挙動である。

また、版厚が厚くなるほど、温度応力が最大値を示す時刻も遅れていることが分かる。坪川は、版厚 42cm のコンクリート舗装版に対する長期観測結果から、版厚が 42cm の場合は、温度応力が最大となるのは版上下面温度差が最大となる時刻から概ね 3 時間後となり、版上下面温度差と温度応力の発生時刻の位相差を指摘している。このことから、版厚 42cm の場合は 3 時間前の版上下面温度差を入力することで、温度応力を精度良く推定できる^[16]としている。ただし、他の版厚の場合は、版上下面温度差からどの程度後の時刻を入力するが良いのか明確でない。3DFEM により温度応力を算定すれば、上記のような版上下面温度差と温度応力の位相差についても、表現できることが示された。

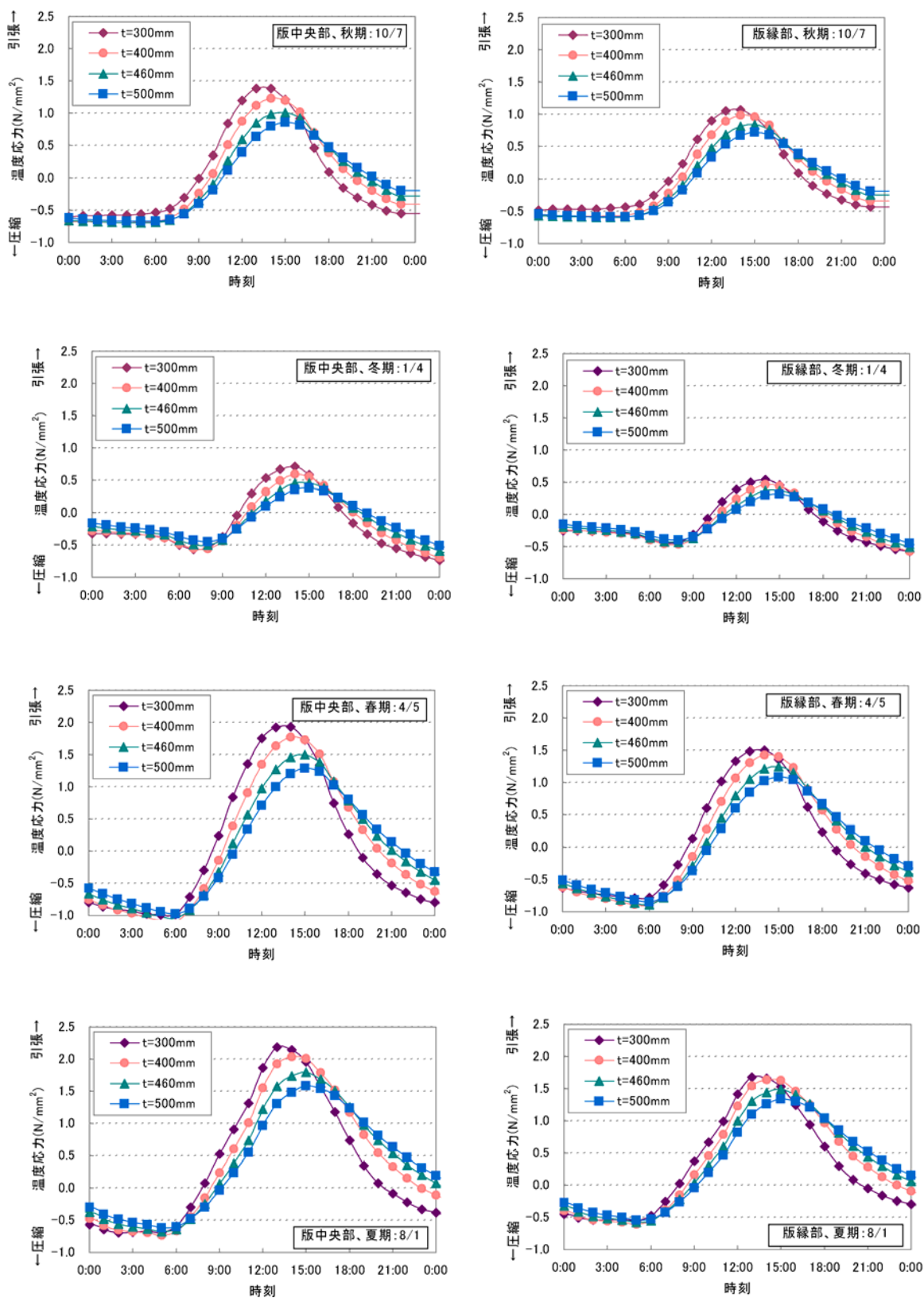


図 4-16 版厚毎の版底面温度応力の経時変化 (左: 版中央部、右: 版縁部)

4.9. 既往の温度応力式との比較

3DFEM 解析により算定した温度応力と、既往の提案式により算定した温度応力の比較を行った。既往の提案式としては、前述したように、以下の2種類の式が提案されている。両式ともに、コンクリート舗装版に対する長期観測結果における温度応力の最大値から導出された式である。

(1) 岩間の提案式

$$\text{コンクリート舗装版中央部： } \sigma_{ie} = 0.7 \cdot \frac{\alpha \cdot E_c \cdot \theta'}{2(1-\nu)} \quad \text{式 (4-55)}$$

$$\text{コンクリート舗装版縁部： } \sigma_{ie} = 0.35 \cdot C_w \cdot \alpha \cdot E_c \cdot \theta' \quad \text{式 (4-56)}$$

ここに、

σ_{ie} : コンクリート版端部の温度応力 (N/mm²)

σ_{ie} : コンクリート版中央部の温度応力 (N/mm²)

C_w : そり拘束度

α : コンクリートの熱膨張係数 ($\mu/^\circ\text{C}$)

θ' : コンクリート版上下面の温度差 ($^\circ\text{C}$)

なお、本研究においては、版縁部の温度応力を算定する際のそり拘束度 C_w については、表 4-2^[17]に基づき、温度差正の場合：0.95、温度差負の場合：0.81（収縮目地間隔=8.5m）と設定した。

表 4-2 そり拘束度

収縮目地間隔 (m)		5.0	6.0	7.5	8.0	10.0	12.5	15.0
C_w	温度差が正の場合	0.85	0.91	0.95	0.95	0.96	0.97	0.98
	温度差が負の場合	0.40	0.55	0.73	0.78	0.90	0.93	0.95

(2) 坪川の提案式

$$\text{コンクリート版中央部： } \sigma_{ie} = \beta \cdot \frac{\alpha \cdot E_c \cdot \theta'}{2(1-\nu)} \quad \text{式 (4-57)}$$

$$\beta = -0.772h + 0.854$$

ここに、

h : コンクリート版厚 (m)

版厚 300mm・400mm・460mm・500mm のコンクリート舗装版に対して、3DFEM により算定した温度応力と、3DFEM において入力した版内温度分布の版上下面温度差を用いて上記の提案式により算定した温度応力について、版中央部における比較結果を図 4-17～図 4-18 に、版縁部における比較結果を図 4-19～図 4-20 に示す。なお、坪川の提案式では、版厚 42cm の場合に 3 時間前の版上下面温度差を入力することで温度応力を推定できるとしている^[16]が、本研究では坪川の提案式により温度応力を算定するにあたって、全版厚に対して 3 時間の版上下面温度差を入力している。また、坪川の式は版縁部におけるものは提案されていないため、版中央部のみの比較としている。

版中央部の比較結果（図 4-17～図 4-18）において、版厚 300～400mm では 3DFEM により算定された温度応力は、岩間の提案式により算定された温度応力に対しては同程度の値となり、坪川の提案式に対しては大きい値をとっている。版厚 460～500mm では 3DFEM により算定された温度応力は、岩間の提案式により算定された温度応力に対しては小さい値となり、坪川の提案式により算定された温度応力に対しては同程度の値を示している。つまり、3DFEM により算定された温度応力に対して、版厚が薄い場合は坪川の提案式では小さく評価、版厚が厚い場合は岩間の提案式では大きく評価していることが分かる。

また、温度応力が最大値を示す時刻については、3DFEM により算定された温度応力は版厚が薄い場合(版厚 300mm 程度)は岩間の提案式による温度応力が最大となる時刻、つまり版上下面温度差が最大となる時刻とほぼ同時刻で最大の温度応力を示している。版厚が厚い場合(版厚 500mm 程度)には、坪川の提案式と同様に、版上下面温度差が最大となる時刻から 3 時間後頃に温度応力が最大値を示していることが分かる。

版縁部の比較結果（図 4-19～図 4-20）においては、版中央部と同様の傾向を示している。しかし、版厚 460～500mm において、版中央部ほど 3DFEM により算定された温度応力と岩間の提案式により算定された温度応力の差異は大きくない。これは、本研究では、岩間のコンクリート舗装版縁部における温度応力の算定式（式 (4-56)）におけるそり拘束度 C_w の値を表 4-2^[17]に基づき、温度差正の場合：0.95、温度差負の場合：0.81（収縮目地間隔=8.5m）と設定したことが一因と考えられる。拘束度は、コンクリート版の上下面の温度差によって変形するのを、コンクリート版の自重や剛性、路盤の支持力および目地の拘束などによってどの程度拘束するかを示す指標である。岩間の提案式では実験的に求めた上記の値を用いており、坪川式では完全拘束を仮定しているが、本来は構造ごとに異なるものである。一方で、3DFEM はこの拘束度を直接、構造解析によって求めることができる。

図 4-21 は、コンクリート舗装版中央部および版縁部の、版底面最大温度応力と版厚の関係をみたものである。以下の 4 種類の方法により算定された、各季節の温度応力の最大値を比較した。

- ・ 3DFEM において、線形温度分布を入力して温度応力を算定
- ・ 岩間が提唱している考え方^[15]を基に、非線形温度分布の影響を考慮するため、上記の 3DFEM

に線形温度分布を入力して算定した温度応力を 0.7 倍して温度応力を算定

- ・ 坪川が提唱している考え方^[16]を基に、非線形温度分布の影響を考慮するため、上記の 3DFEM に線形温度分布を入力して算定した温度応力を $(-0.772h+0.854)$ 倍して温度応力を算定
- ・ 3DFEM において、非線形温度分布つまり熱伝導解析より得られたそのままのコンクリート舗装版内温度分布を入力して温度応力を算定

3DFEM において線形温度分布を入力して温度応力を算定した場合、温度応力は厚さ 400mm までは版厚が厚くなるほど応力は若干増加するが、それ以上になると減少する。これは、自重による拘束の増加よりも版厚が厚くなることによる曲げ剛性の増加が上回り、拘束の度合いが相対的に減少し岩間らが仮定した完全拘束の状態にならないためである。つまり、版厚が薄い場合は、自重によって反り変形が完全に拘束されきれず、若干反った状態になるため、その分だけ拘束応力が減少する。

3DFEM において非線形温度分布を入力して温度応力を算定した場合は、前述したように版厚が厚くなるほど温度応力は小さくなる。特に、線形温度分布を入力した場合に対する 300mm→400mm の温度応力の低減量に比べて、400mm→500mm の温度応力の低減量の方が大きく、版厚に比例して温度応力の低減量も大きくなることを示している。

岩間が提唱している考え方に基づき、3DFEM に線形温度分布を入力して算定した温度応力を 0.7 倍して非線形温度分布の影響を考慮した場合は、版厚 300mm では非線形温度分布を入力して算定した温度応力と同じ程度の値になり、岩間の考え方の妥当性が確認できる。しかし、それ以上の版厚になると 0.7 倍したものよりも、非線形温度分布を入力して算定した温度応力は小さくなり、この考え方は妥当ではなくなる。さらに、版厚が厚くなるほど、その差異は大きくなっていることが分かる。

坪川が提唱している考え方に基づき、3DFEM に線形温度分布を入力して算定した温度応力を $(-0.772h+0.854)$ 倍して非線形温度分布の影響を考慮した場合は、外気温が小さく版上下面温度差も小さい秋・冬期においては、殆ど同じ値を示していることが分かる。また、外気温が大きく版上下面温度差も大きい春・夏期においても、版厚 460mm・500mm では非線形温度分布を入力して算定した温度応力と同じ程度の値になり、坪川の考え方の妥当性が確認できる。しかし、それ以下の版厚になると $(-0.772h+0.854)$ 倍したものよりも、非線形温度分布を入力して算定した温度応力は大きくなり、この考え方は妥当ではなくなる。

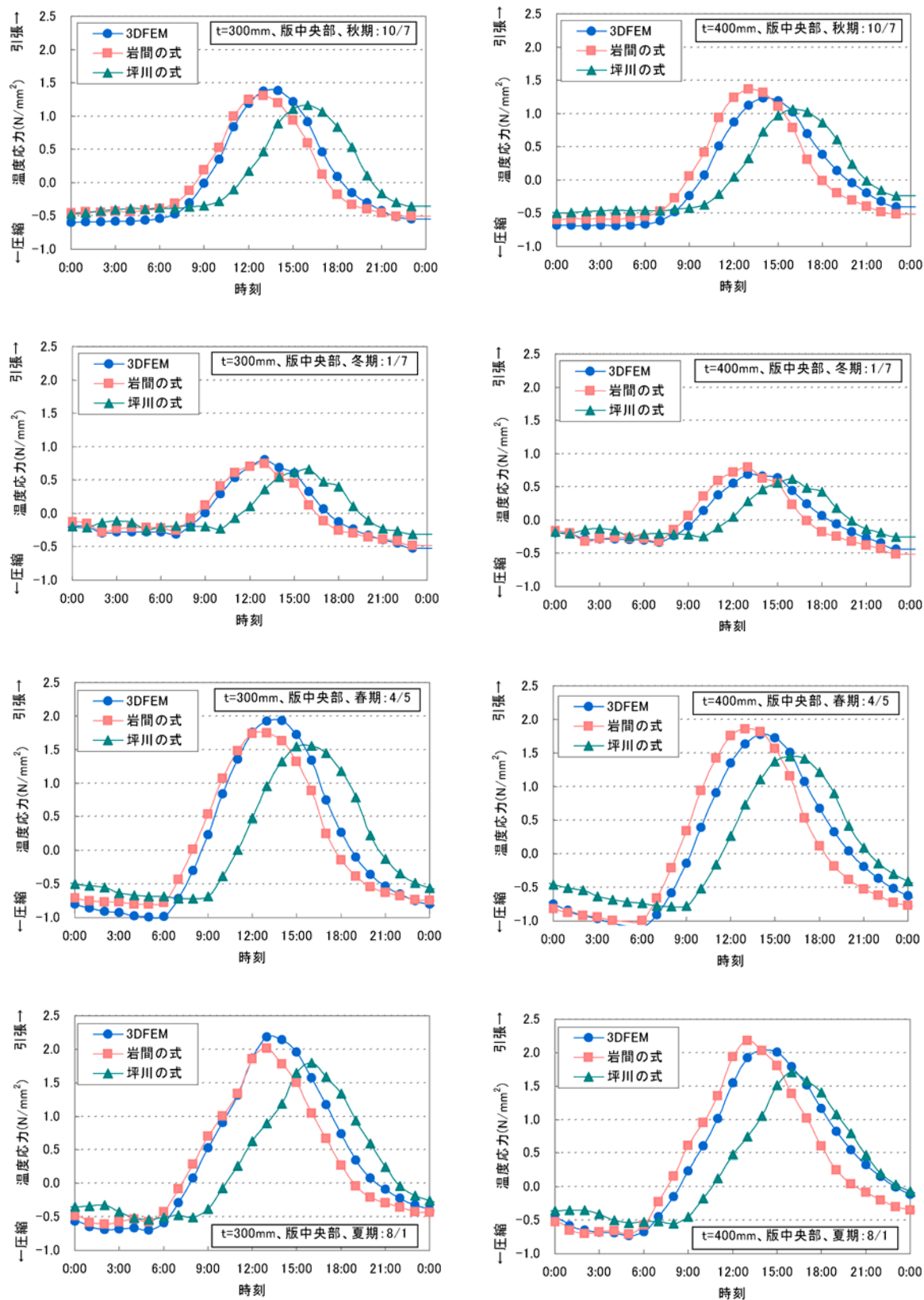


図 4-17 算定手法毎の版底面-版中央部温度応力の比較その 1 (左 : t=300mm、右 : t=400mm)

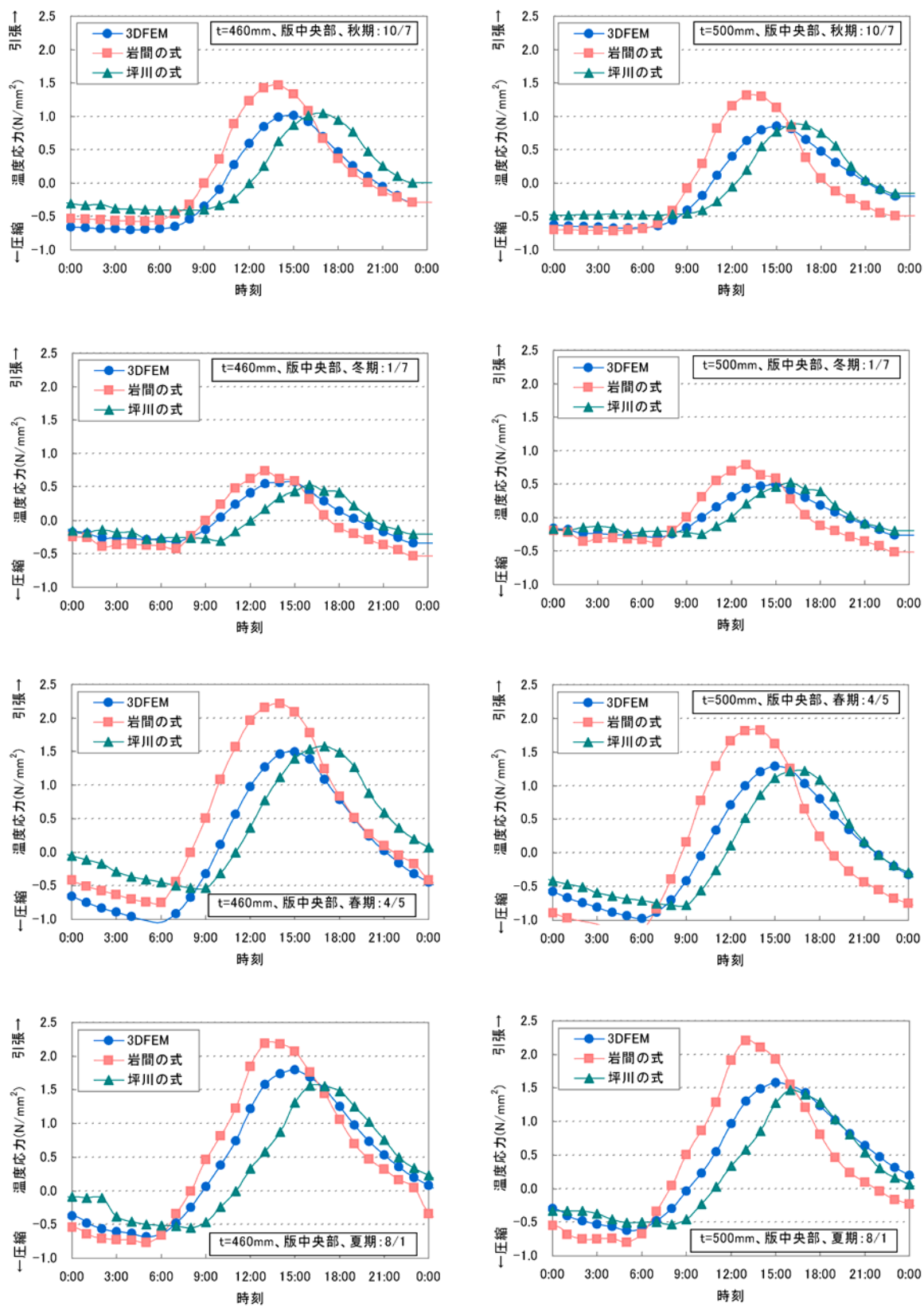


図 4-18 算定手法毎の版底面-版中央部温度応力の比較その 2 (左 : $t=460\text{mm}$ 、右 : $t=500\text{mm}$)

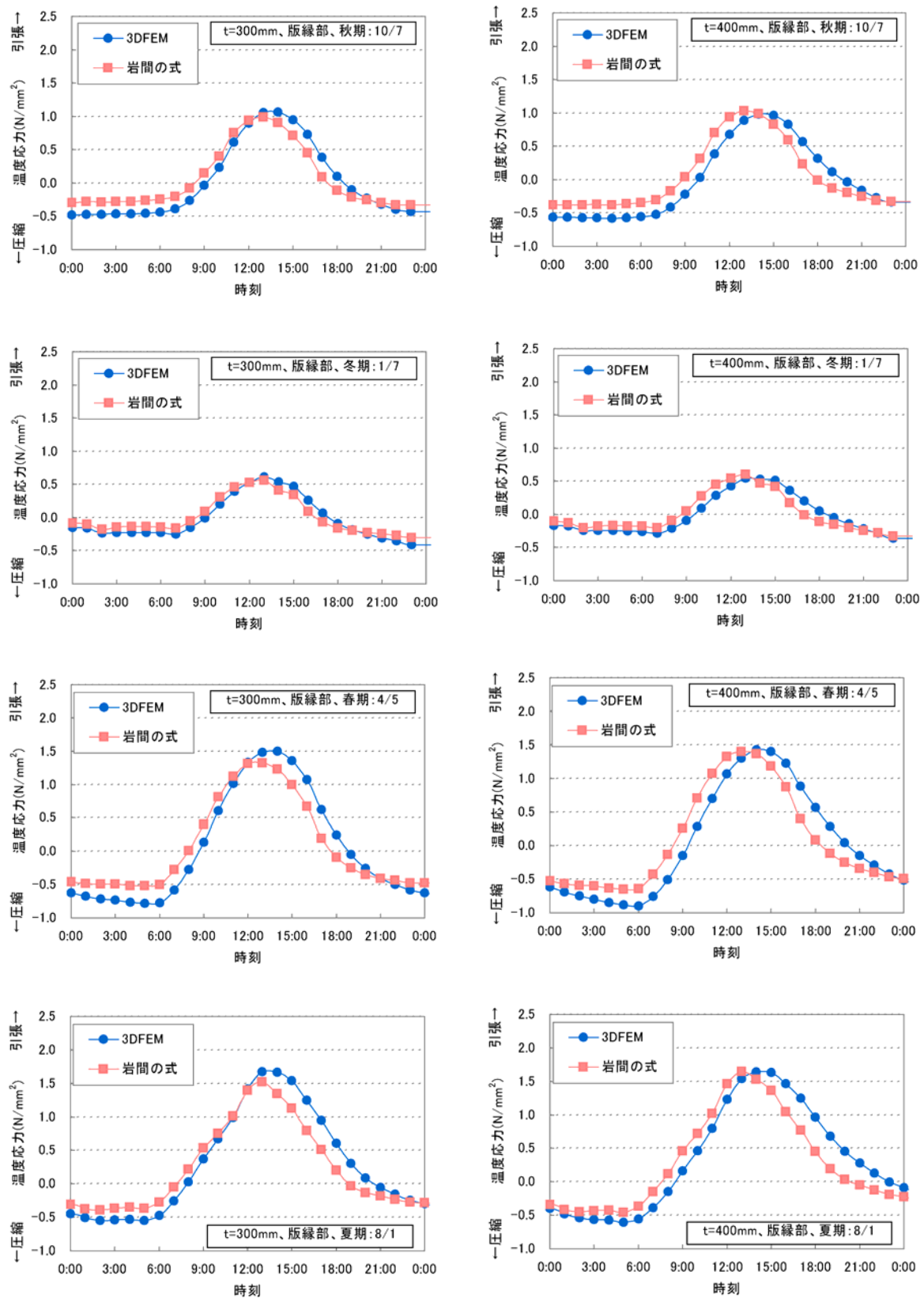


図 4-19 算定手法毎の版底面-版縁部温度応力の比較その 1 (左: $t=300\text{mm}$ 、右: $t=400\text{mm}$)

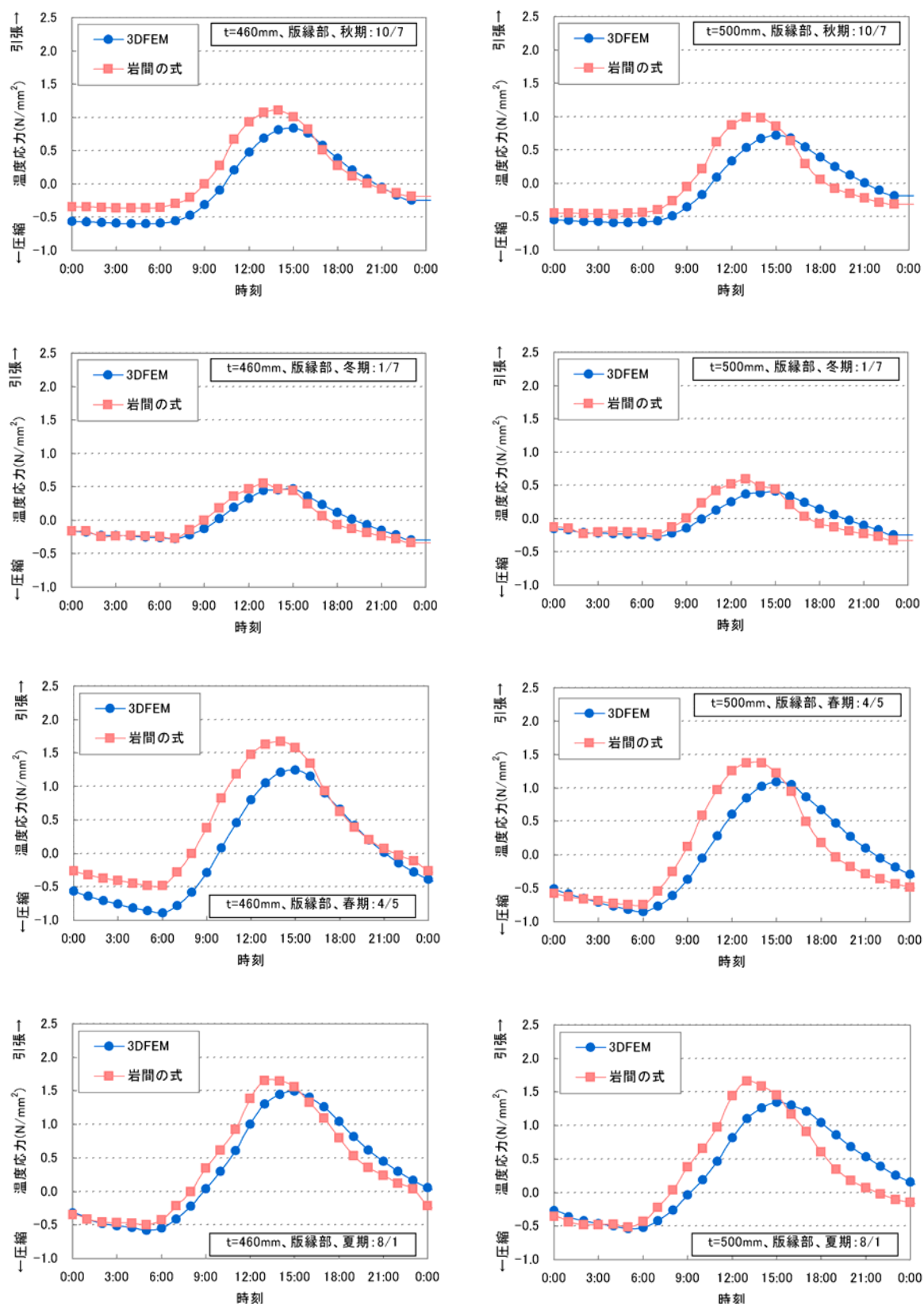


図 4-20 算定手法毎の版底面-版縁部温度応力の比較その 2 (左: $t=460\text{mm}$ 、右: $t=500\text{mm}$)

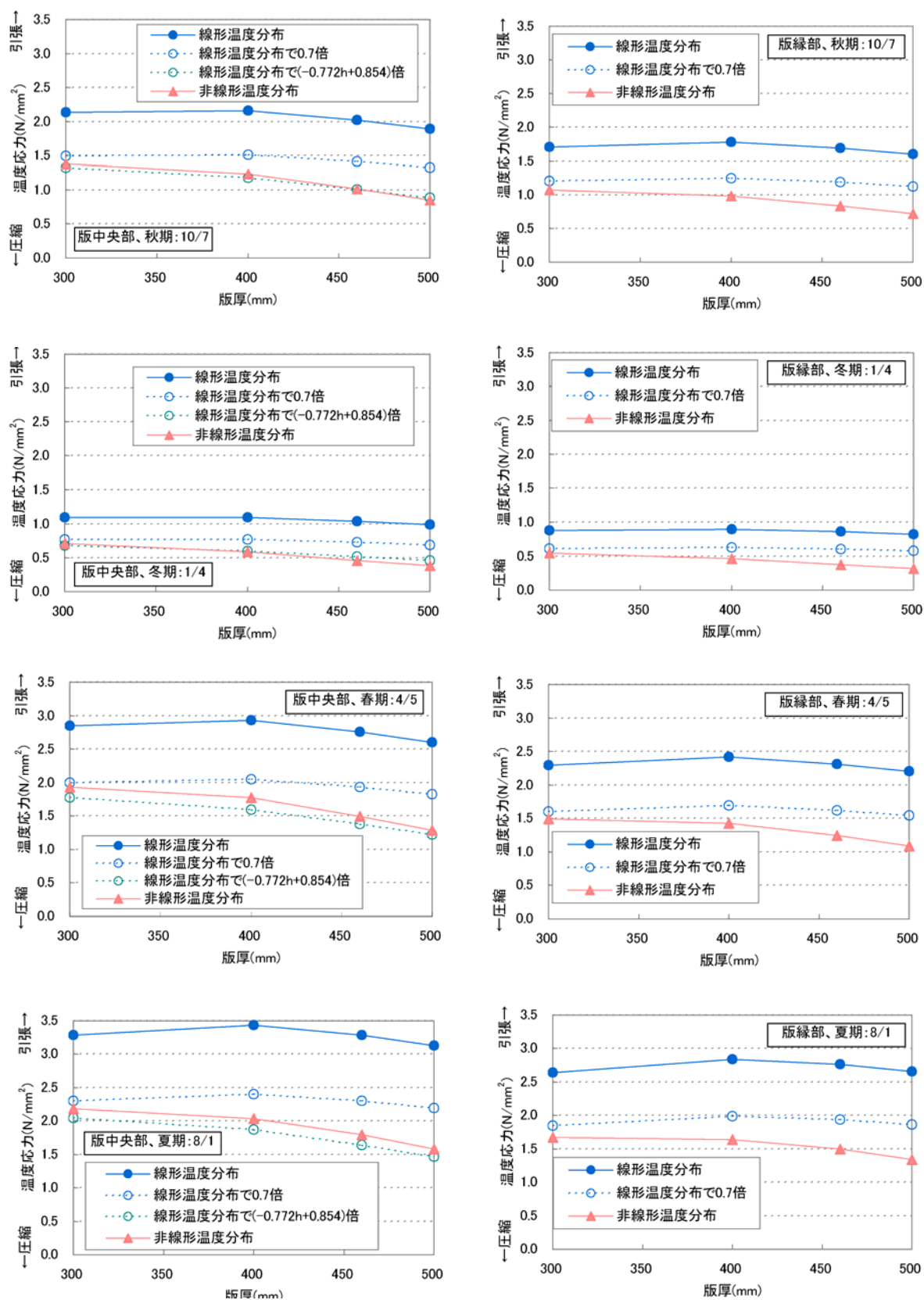


図 4-21 最大温度応力に及ぼす版厚の影響 (左: 版中央部、右: 版縁部)

4.10. おわりに

本章では、3 章において熱伝導解析により得られたコンクリート舗装版内の温度分布を入力し、3DFEM により理論的に温度応力を算定する手法の提案を行い、コンクリート舗装版の温度応力についての検証を行った。その結果、以下のことが確認された。

- ・4.5 において示したように、拘束ひずみ・温度応力について計測結果から算定されたものと、3DFEM により算定されたものを比較した結果、拘束ひずみについては一致する。温度応力については、温度分布・計測値から算定する際の精度等に起因する誤差はあるものの、全体としての挙動はよく一致している。これらから、3DFEM による温度応力の算定手法の適用性が確認された。
- ・4.6 において示したように、版上下面温度差が同一であっても、温度分布の非線形性が異なれば、温度応力は大きく異なることが確認された。このことから、従来の岩間の提案式・坪川の提案式のように、版上下面温度差の 1 次式として温度応力を算定するのではなく、温度分布を適切に考慮できる 3DFEM による温度応力の算定手法の有用性が示された。
- ・4.7 において示したように、版表面・版底面ともに、版中央部の方が版縁部よりも温度応力はわずかに大きく、版中央部から版縁部にかけて温度応力は減少していく傾向を示すことが確認できた。このように、3DFEM により温度応力を算定することで、版内平面位置が及ぼす温度応力の影響を詳細に表現できることが示された。
- ・4.8 において示したように、版厚が厚くなることで温度応力の最大値自体は小さくなるが、この傾向は外気温が大きいほど顕著であり、版厚が温度応力に及ぼす影響の大きさは気象条件にも依存することが確認された。これは、岩間の提案式・坪川の提案式のように、計測結果から算定された日温度応力の最大値のみから、温度応力を推定した場合には表現できない挙動である。
- ・4.9 において示したように、版厚が薄い場合（300mm 程度）は、3DFEM により算定された温度応力の最大値は、岩間の提案式によるものと同程度の値を示すが、それ以上になると岩間の提案式では過大に評価することとなる。一方で、版厚が厚い場合（500mm 程度）は、3DFEM により算定された温度応力の最大値は、坪川の提案式によるものと同程度の値を示すが、それ以下になると坪川の提案式では過小に評価することとなることが確認された。

以上のように、本章では 3DFEM による温度応力の算定手法を確立できたとともに、温度応力について詳細に検討を行い、その挙動を明確にすることができた。また、従来の温度応力の提案式との比較を行うことで、3DFEM の有用性についても確認した。5 章では、本章で算定された温度応力を用いて疲労度算定を行い、合理的な舗装設計の一提案を試みる。

参考文献

- [1]Westergaard, H.M. : Computation of Stresses in Concrete Roads, Proc. of HRB, Vol.5, pp.90-112, 1925
- [2]日本道路協会：セメントコンクリート舗装要綱，丸善，1981
- [3]土木学会：コンクリート標準示方書 舗装編，1995
- [4]竹内康：路盤の支持力変化を考慮したコンクリート舗装設計法に関する研究，長岡技術大学博士論文，2000
- [5]西澤辰男，福手勤，国分修一：弾性平板 FEM に基づくコンポジット系舗装の解析法に関する研究，土木学会論文集，第 613 号，V-42，pp.237-247，1999
- [6]西澤辰男：3 次元 FEM に基づいたコンクリート舗装構造解析パッケージの開発，土木学会舗装工学論文集，第 5 巻，pp.112-121，2000
- [7]United States General Accounting Office : Transportation Infrastructure, Highway Pavement Design Guide is Outdated, Report to the Secretary of Transportation, GAORCED-98-9,1997
- [8]Proc. Of National Conference on 3Dimensional Finite Element Method for Pavement Design, Charle-stone, WestVirginia, 1998
- [9]西澤辰男，笠原篤：舗装の構造解析および設計に対する 3 次元有限要素モデルに関するシンポジウム，舗装,Vol.34,No.4,pp.28-30,1999
- [10]O.C.ツィエンキーヴィッツ，吉識雅夫，山田嘉昭監訳：マトリックス有限要素法，培風館，1996
- [11]社団法人 日本道路協会：セメントコンクリート舗装要綱，丸善，1981
- [12]西澤辰男：3 次元 FEM に基づいたコンクリート舗装横目地におけるダウエルバーモデル，土木学会論文集，No.683，V-52，145-156，2001
- [13]Przemienieki, J.K. : Theory of Matrix Structural Analysis, McCraw – Hill, Inc., p.79, 1968
- [14]Taizo Shimomura, Tatsuo Nishizawa, Takato Ozeki : Evaluation of Thermal Stress in Airport Concrete Pavement Slab by 3D-FEM Analysis, International Society for Concrete Pavements, 2008
- [15]岩間滋：コンクリート舗装の構造設計に関する実験的研究，土木学会論文集，No.111，pp16-46，1964
- [16]坪川将文，水上純一，八谷好高，亀田昭一：日温度変化による空港コンクリート舗装の温度応力に関する研究，土木学会舗装工学論文集，第 12 巻，pp.157-164，2007
- [17]社団法人 日本道路協会：舗装設計便覧，pp179，2006

5. 疲労度設計手法の合理化の提案

5.1. はじめに

我が国における空港コンクリート舗装設計に関しては、古くは Westergaard による応力・たわみ式がその根底に存在しており、一般的な空港コンクリート舗装の設計手順として、「空港舗装構造設計要領，(財)港湾空港建設技術サービスセンター，平成 11 年 4 月」^[1]に従い，舗装構造の設計が行われてきた．この設計手法においては，設計年数として将来の交通量を推定する対象期間を定義し，経験的に 10 年間を想定している．言い換えれば，これまでの各地の空港において，10 年間はコンクリート舗装に作用する外的要因に大きな変更はなく，設計された構造が十分に使用性・供用性・耐久性を満足するという思想に立っていると考えられる．また上記設計手法において設計された空港コンクリート舗装が十分な耐久性を有していることが実証されている．

これに対し，道路舗装においては，「舗装設計便覧 (社)日本道路協会 平成 18 年 2 月」^[2]において，経験に基づく設計方法と理論的設計方法によるものについて記述し，設計期間については 20 年を一般的に想定している．しかしながら，理論的設計法による場合は，任意に設定することができると記述されており，構造的なひび割れによるコンクリート舗装の劣化に対して，信頼性を考慮した設計手法を採用している．こうした信頼性設計においては，疲労破壊輪数や舗装計画交通量に対して信頼度に応じた係数を適用する方法，地盤・材料などに信頼度に応じた係数を適用する方法が提案されている(「舗装設計施工指針 (社)日本道路協会 平成 18 年 2 月」)^[3]．

こうした流れを受け，空港コンクリート舗装の設計においても，近年の目まぐるしい航空需要の増大も相まって，「空港舗装設計要領及び設計例，(財)港湾空港建設技術センター，平成 20 年 7 月」^[4]に示すような理論的設計手法である疲労度設計法により，10 年以上の設計年数を想定して設計する事例が始まっている．本研究においても，このような信頼性設計を取り入れた疲労度設計法に基づき，各種検討を行うこととする．

疲労度設計法において，考慮する荷重応力としては，1)航空機荷重応力，2)温度応力を個別に算出し，コンクリート疲労破壊曲線によりコンクリート舗装版の疲労度を照査して疲労度設計を行う．ここで，温度応力の算出法として，従来は前述したように岩間の提案式により算出していた．しかし，前述したように岩間の提案式による温度応力は過大評価しており，また温度応力の挙動について不明確な点も多いため，本研究では 4 章で述べたように，3DFEM による理論的算定法により温度応力を評価した．このように，3DFEM により算定した温度応力を用いて疲労度設計を行うことで，より合理的な舗装設計を行うことが可能となる．

また，疲労度を算定するにあたり，ある値をもった温度応力がどの程度の頻度(回数)で生じるか，

つまり温度応力の発生頻度を算定する必要がある。従来の手法では、版上下面温度差の発生頻度を用いて、岩間の提案式により温度応力の発生頻度を算定していた。その版上下面温度差発生頻度については、現行の指針^[2]では、実測値から設定することが望ましいとしながら、一例としてコンクリート舗装版上下面温度差の発生頻度を示している。しかし、版厚 15~30cm までのものしかなく、空港コンクリート舗装のような版厚が厚い場合に同様の発生頻度とはならない恐れがある。さらに、この中では、コンクリート舗装版が曝される気象条件としては、温度差が小さいところ・大きいところといった区分しかないため、空港が位置する場所によっては、現行の手法における発生頻度では適用できない可能性もある。つまり、従来の手法では、対象とするコンクリート舗装版の版厚および気象条件に適した版上下面温度差発生頻度、およびそれから求まる温度応力の発生頻度を適切に評価できない恐れがある。その差異が温度応力、およびその温度応力を用いて算定される疲労度に及ぼす影響は大きいことは既往の研究においても示されている^[5]。また、既往の研究において版上下面温度差に対する解析的な研究^{[6][7]}も行われているものの、いずれもある特定の版厚に対するものであり、様々な版厚に対して行われたものではない。

それに対して、本研究では、3章で述べたように、このような版厚や気象条件を考慮した各日時のコンクリート舗装版の温度分布についても、熱伝導解析により適切に評価できる手法を確立した。したがって、この温度分布を用いた 3DFEM により、各日時のコンクリート舗装版の温度応力を算定し、版上下面温度差の発生頻度を用いるのではなく、直接温度応力の発生頻度を算定することが可能となる。

本章では、上記のような熱伝導解析・3DFEM により、版厚・気象条件を考慮して理論的に算定した温度応力を用いた疲労度を算定し、温度応力に着目した疲労度設計の合理化の一提案を行う。また、温度応力についての従来の提案式と本研究で提案した手法の比較を行い、温度応力の算定法の違いが疲労度に及ぼす影響を検証する。最後に、今回の提案手法により、気象条件の異なる国内の 2 地点における空港コンクリート舗装版の試設計を行い、その有用性の確認を行う。

本章の概要をまとめたフローチャートを図 5-1 に示す。

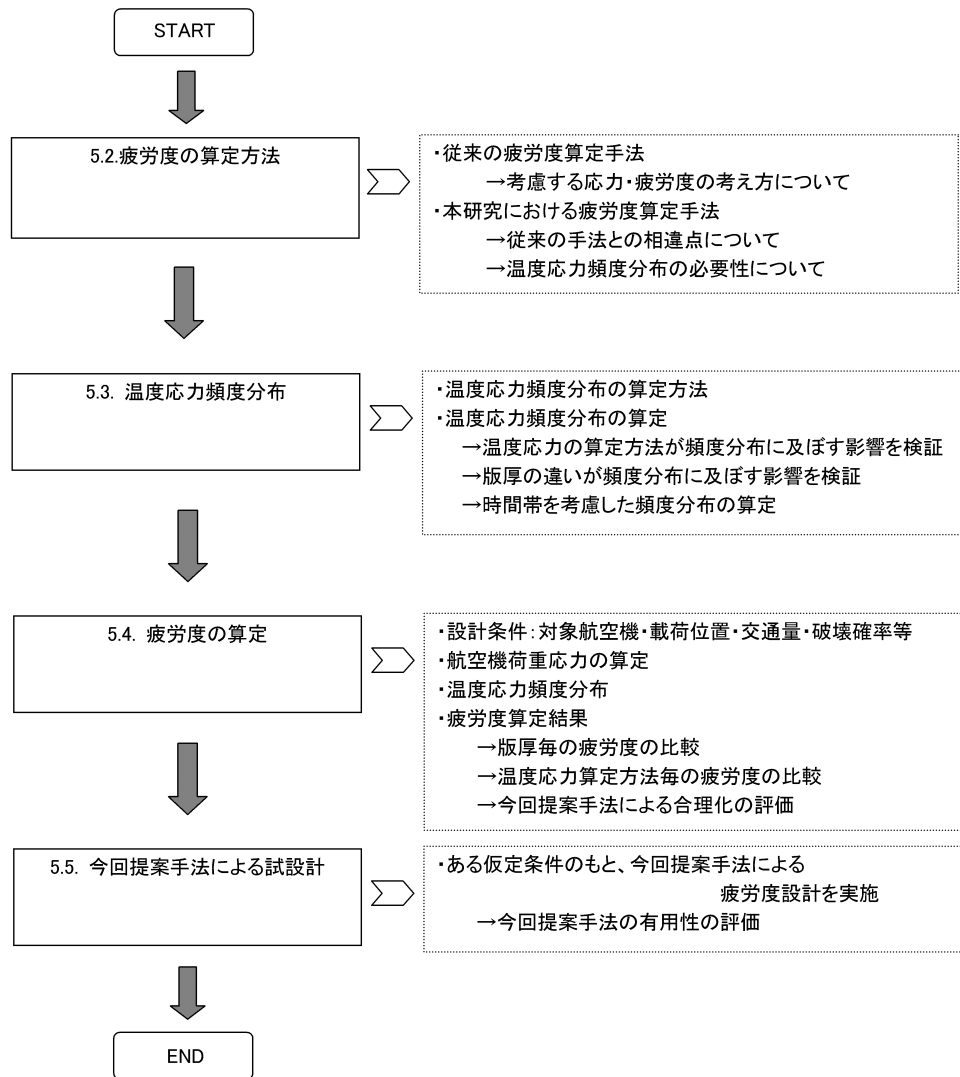


図 5-1 5 章の概要

5.2. 疲労度の算定方法

5.2.1. 従来の疲労度算定手法

(1) 疲労度算定方法

前述したように、空港コンクリート舗装版の疲労度解析においては、1)航空機の輪荷重により発生する応力、2)コンクリート版上下面温度差によって生じる温度応力を考慮する必要がある。

いま、コンクリート舗装版の疲労度解析のため、舗装版を図 5-2 に示すように微小メッシュに細分化し、各メッシュ毎の疲労度を算定する。同図では、版中央部に航空機の輪荷重が载荷した場合を例示している。そこで、同図中における点(j,k)における疲労度を算定するために、縦軸 k 上に航空機 4 輪荷重の前輪 2 輪の中心が位置し、横軸 i 方向に航空機荷重位置が確率分布すると考える。

航空機荷重が横軸位置 i 点に作用する頻度を f_i 、その場合に点(j,k)における航空機荷重により生じる応力度を $\sigma_L(i,j,k)$ とする。また、点(j,k)におけるコンクリート舗装版上下面温度差 $d^{\circ}\text{C}$ となる頻度を f_d 、その場合の温度応力を $\sigma_t(d,j,k)$ とする。つまり、航空機荷重が i 点を通過し、コンクリート舗装版上下面温度差 $d^{\circ}\text{C}$ となる場合の、点(j,k)に作用する合成応力 $\sigma_b(i,d,j,k)$ は、航空機荷重により生じる応力 $\sigma_L(i,j,k)$ と、温度応力 $\sigma_t(d,j,k)$ の重ね合わせとして表される。この合成応力をコンクリートの設計基準曲げ強度で除することにより、後述する応力レベル SL を求めることができる。さらに、全体の交通量を N_{total} とした場合、航空機荷重が i 点を通過し、コンクリート舗装版上下面温度差 $d^{\circ}\text{C}$ となる場合の交通量は、 $f_i \times f_d \times N_{total}$ として表される。

その上で、後述する破壊確率を用いて、合成応力 $\sigma_b(i,d,j,k)$ が作用するときの許容繰返し回数を $N(d,i,j,k)$ と表そう。この時、マイナー則を用いて、メッシュ点(j,k)での疲労度は下式のように表せる。(疲労度=(ある曲げ応力の発生回数)/(ある曲げ応力に対する許容繰返し回数))

$$DF(j,k) = \sum_i \sum_d \frac{f_i f_d N_{total}}{N_{allowable}(\sigma_L, \sigma_t)} \quad (\text{式 5-1})$$

ここに、

$DF(j,k)$: 位置(j,k)における疲労度

f_i : 航空機荷重が横軸位置 i 点に作用する相対頻度

f_d : コンクリート舗装版上下面温度差 $d^{\circ}\text{C}$ となる相対頻度

N_{total} : コンクリート舗装版に作用する航空機荷重の総回数 (全体交通量)

$N_{allowable}(\sigma_L, \sigma_t)$: 曲げ応力 $\sigma_b(= \sigma_L(i,j,k) + \sigma_t(d,j,k))$ での許容繰返し回数

σ_L : 脚載荷位置 i の場合の位置(j,k)における航空機荷重により生じる応力

σ_t : 上下面温度差 $d^{\circ}\text{C}$ のとき位置(j,k)での温度応力

許容繰返し回数 $N_{allowable}$ は以下の式により求める。

$$N_{allowable} = 10^{(a-SL)/b}$$

$$a = 1.11364 + 0.00165P_f \quad (\text{式 5-2})$$

$$b = 0.09722 - 0.00021P_f$$

ここに,

P_f : 適用する破壊確率

SL : 応力レベル (合成応力/設計基準曲げ強度 = σ_b / σ_a)

(2) 温度応力

従来の疲労度算定手法において温度応力については、2章に示したような、岩間の提案式、または坪川の提案式により温度応力を求める。その際の版上下面温度差とその発生頻度として、舗装設計便覧^[2]に示される表 5-1 の値を用いて疲労度を算定する。下表を用いることにより、版上下面温度差 $d^{\circ}\text{C}$ の場合の温度応力 $\sigma_{(j,k,d)}$ が発生する頻度 f_d を算定することができる。

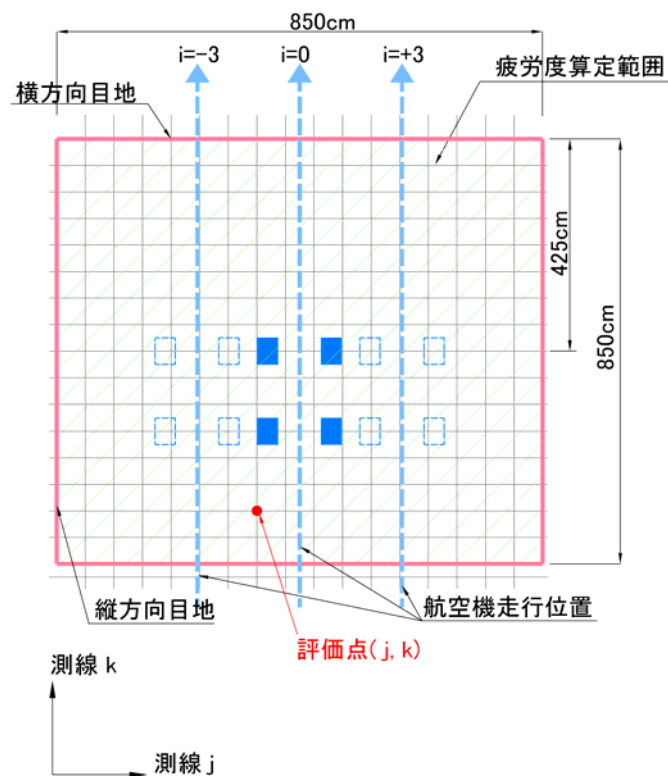


図 5-2 疲労度評価測線位置の模式図

表 5-1 版上下面温度差発生頻度

温度差(°C) \ 版厚 (cm)	温度差の小さいところ						温度差の大きいところ					
	15	20	23	25	28	30	15	20	23	25	28	30
19 (18~19.9)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.005	0.010	0.012
17 (16~17.9)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.015	0.018	0.018	0.020
15 (14~15.9)	0.000	0.000	0.001	0.002	0.004	0.007	0.005	0.020	0.028	0.032	0.037	0.038
13 (12~13.9)	0.005	0.007	0.012	0.016	0.021	0.025	0.015	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040
11 (10~11.9)	0.020	0.028	0.032	0.037	0.045	0.053	0.040	0.060	0.050	0.050	0.045	0.045
9 (8~9.9)	0.050	0.060	0.075	0.085	0.080	0.080	0.070	0.070	0.075	0.080	0.080	0.080
7 (6~7.9)	0.100	0.110	0.110	0.110	0.110	0.115	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.105
5 (4~5.9)	0.135	0.140	0.150	0.155	0.150	0.140	0.120	0.120	0.125	0.125	0.125	0.125
3 (2~3.9)	0.190	0.195	0.200	0.205	0.210	0.210	0.200	0.195	0.190	0.190	0.190	0.185
1 (0~1.9)	0.500	0.460	0.420	0.390	0.380	0.370	0.450	0.390	0.375	0.360	0.355	0.350
-1 (0.1~2.0)	0.650	0.615	0.610	0.600	0.530	0.480	0.510	0.450	0.420	0.410	0.400	0.390
-3 (2.1~4.0)	0.350	0.360	0.345	0.335	0.360	0.380	0.340	0.330	0.330	0.320	0.320	0.320
-5 (4.1~6.0)	0.000	0.025	0.044	0.063	0.100	0.120	0.150	0.200	0.220	0.220	0.225	0.230
-7 (6.1~8.0)	0.000	0.000	0.001	0.002	0.010	0.020	0.000	0.020	0.030	0.048	0.052	0.055
-9 (8.1~10.0)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.003	0.005

5.2.2. 本研究における疲労度算定手法

本研究では温度応力を岩間の提案式・坪川の提案式のように版上下面温度差から算出するのではなく、3DFEM を用いて直接算定するため、表 5-1 の版上下面温度差とその発生頻度を用いて温度応力の発生頻度を求める必要はない。

そこで、本研究では、3DFEM により算定された各版厚毎の温度応力を整理することにより算定した、温度応力の頻度分布を用いる。温度応力の頻度分布の詳細については、5.3 に示す。疲労度は温度応力の頻度分布を考慮して下式のように表される。図 5-3 に従来および本研究の疲労度設計手法の比較を示す。

$$DF(j,k) = \sum_i \sum_d \frac{f_i f_{\sigma_i} N_{total}}{N_{allowable}(\sigma_L, \sigma_i)} \quad (式 5-3)$$

ここに、

f_{σ_i} : コンクリート舗装版に生じる温度応力が σ_i となる頻度



図 5-3 従来および本研究の疲労度設計手法の比較

5.3. 温度応力頻度分布

5.3.1. 温度応力頻度分布の算定方法

前述したように、本研究では温度応力を岩間の提案式のように版上下面温度差から算出するのではなく、3DFEMを用いて直接算定するため、版上下面温度差とその発生頻度を用いて温度応力の発生頻度を求める必要はない。そこで、本研究では、3DFEMにより算定された1年間にわたる各日時の温度応力より温度応力の頻度分布を算定した。

温度応力の頻度分布は、図 5-4 に示すように、1 時間毎の温度応力について、ある応力域（本研究では 0.1N/mm^2 でスライスした範囲）に存在する温度応力の個数に対する全体の個数の比率で表わされる。つまり、ある温度応力 σ_i が生じる発生頻度 $f(\sigma_i)$ は、その個数 $n(\sigma_i)$ と全体の個数 N_{total} を用いて、下式のように表される。

$$f(\sigma_i) = \frac{n(\sigma_i)}{N_{total}} \quad (\text{式 5-4})$$

但し、 $\sum_i f(\sigma_i) = 1$

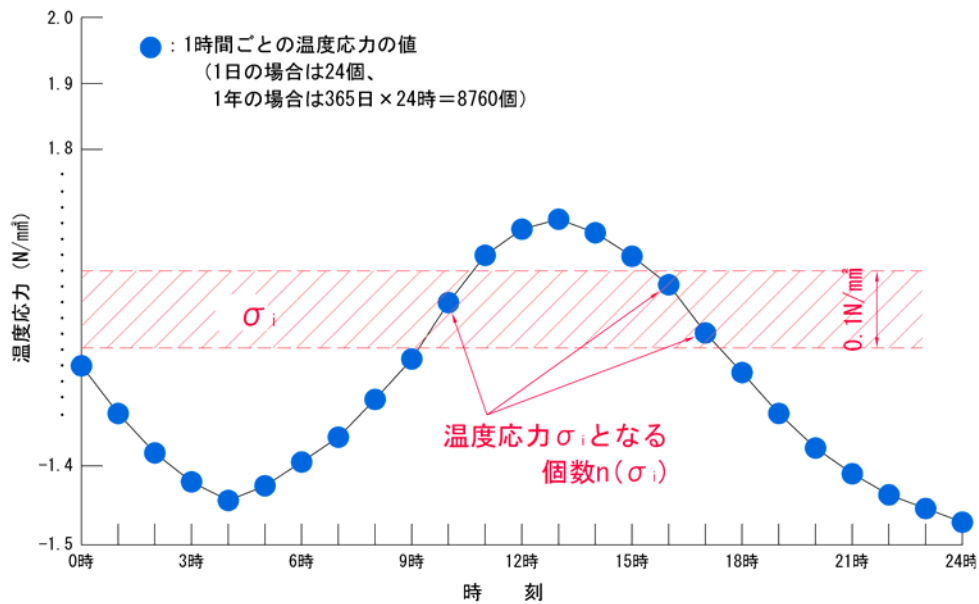


図 5-4 温度応力の算定方法イメージ図

5.3.2. 温度応力頻度分布に及ぼす温度応力算定手法の影響

5.3.1 に示す方法により，温度応力の頻度分布を算定した．ここでは，3DFEM により算定した温度応力に加えて，図 4-17～図 4-20 に示すような岩間の提案式および坪川の提案式により算定した温度応力に対しても，1 年間分の温度応力頻度分布を算定し，各温度応力算定手法毎の比較も行った．

図 5-5 および図 5-6 に版底面の温度応力頻度分布を示す．版厚 300mm, 400mm, 460mm, 500mm に対して，各々版中央部・縁部の温度応力算定手法毎の温度応力頻度分布を示している．

版中央部の温度応力頻度分布については，各版厚・各算定手法の全てにおいて，圧縮域で頻度分布のピークを示している．また，低引張応力域での挙動は，どの算定手法でも同様であるが，高引張応力域での挙動は，温度応力の算定手法毎に異なる．高引張応力域における温度応力の発生頻度は，岩間の提案式によるものが一番大きく，坪川の提案式によるものが一番小さい．3DFEM によるものはこれらの中に位置している．これは 4.9. に示したような算定手法毎の温度応力そのものの比較と同様の傾向であり，この頻度分布が妥当なものであることを示している．これらのことから，疲労度についても，高引張応力域における発生頻度が大きい岩間の提案式による温度応力を用いた疲労度が一番大きく，高引張応力域における発生頻度が小さい坪川の提案式による温度応力を用いた疲労度は一番小さくなるものと推測される．

版縁部の温度応力頻度分布についても，版中央部と同様の挙動を示している．しかし，版中央部ほど 3DFEM によるものと岩間の提案式によるものの差異は大きくない．これは，本研究では，岩間のコンクリート舗装版縁部における温度応力の算定式（式 (4-56)）におけるそり拘束度 C_w の値を表 4-2 に基づき，温度差正の場合：0.95、温度差負の場合：0.81（収縮目地間隔=8.5m）と設定したことが一因と考えられる．拘束度は，コンクリート版の上下面の温度差によって変形するのを，コンクリート版の自重や剛性，路盤の支持力および目地の拘束などによってどの程度拘束するかを示す指標である．岩間の提案式では実験的に求めた上記の値を用いており，坪川式では完全拘束を仮定しているが，本来は構造ごとに異なるものである．一方で，3DFEM により温度応力を算定する場合は，この拘束度を直接，構造解析によって求めることができる．

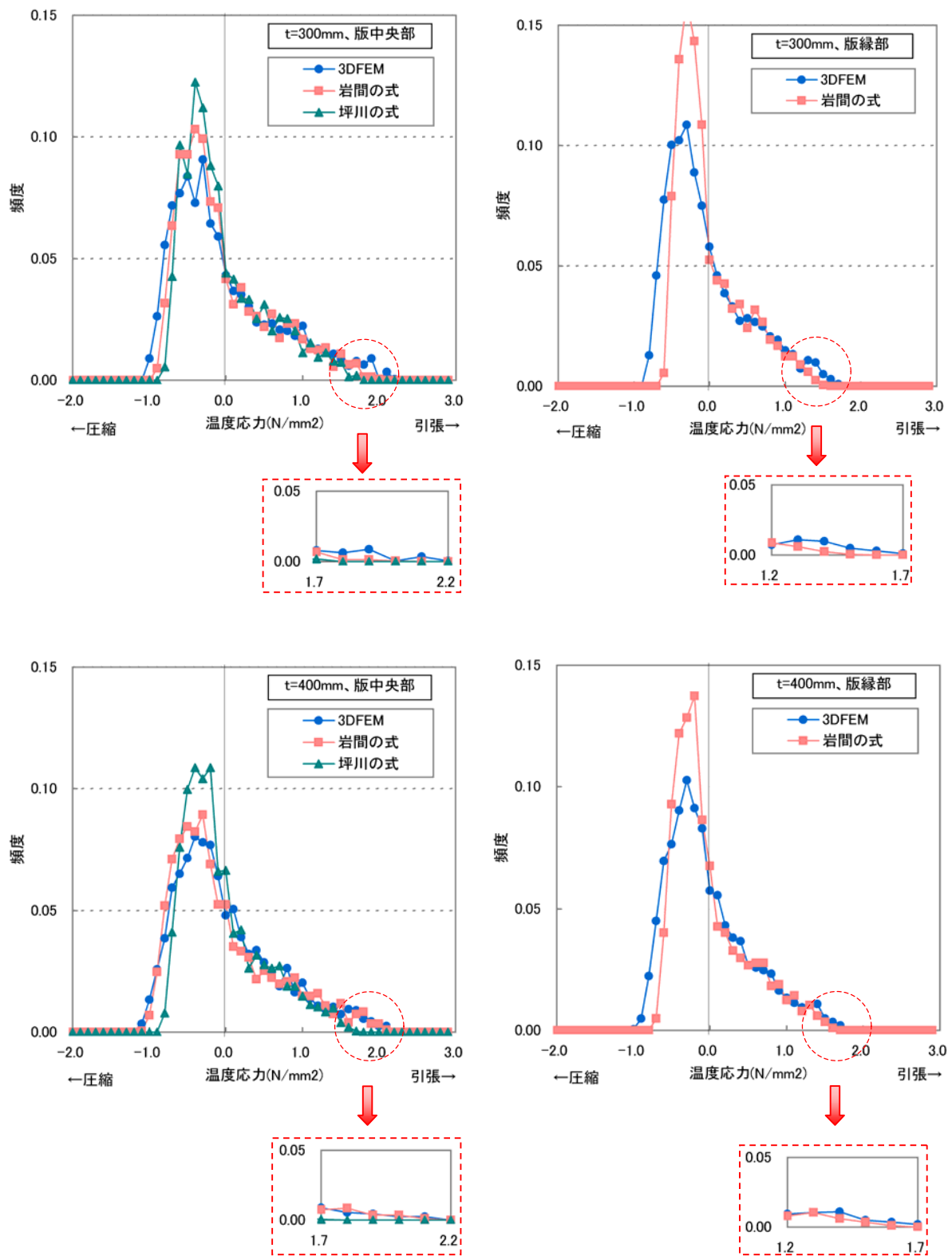


図 5-5 版底面の温度応力頻度分布その 1 版厚 300mm・400mm (左：版中央部、右：版縁部)

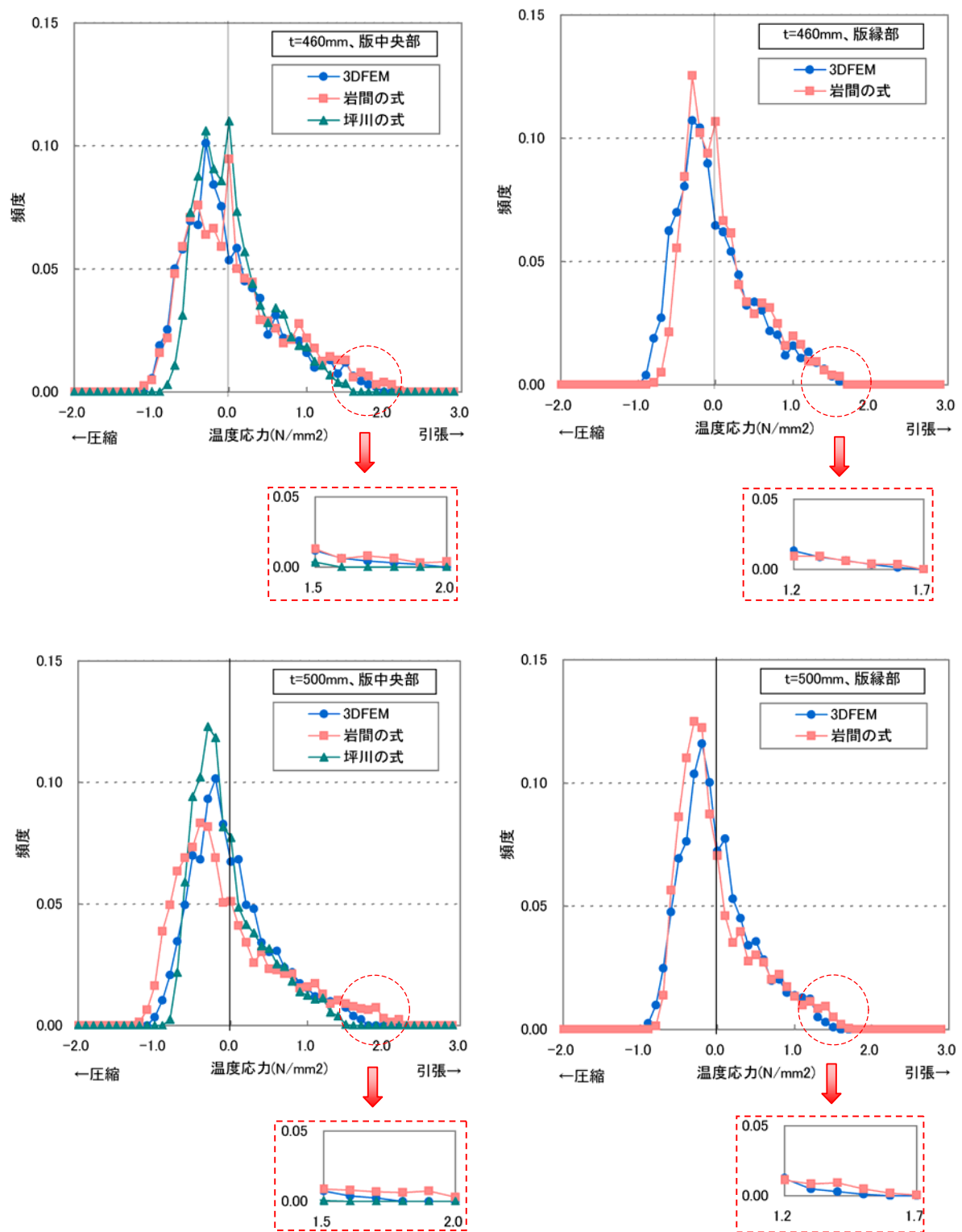


図 5-6 版底面の温度応力頻度分布その 2 版厚 460mm・500mm (左：版中央部、右：版縁部)

5.3.3. 温度応力頻度分布に対する版厚の影響

図 5-7 および図 5-8 に、3DFEM により算定された温度応力について、版厚毎の温度応力頻度分布の比較を示す。図 5-7 に版中央部の、図 5-8 に版縁部の、各々版表面・版底面における温度応力に対する、版厚毎の頻度分布の比較を示している。

版底面については、版中央部・版縁部ともに、版厚が厚くなるほど、引張応力の最大値は小さくなり、高引張応力域 ($1\sim 2\text{N/mm}^2$) での発生頻度も小さくなる傾向を示す。一方で、版厚が厚くなるほど低引張域 ($0\sim 1\text{N/mm}^2$) での頻度は多くなる。つまり、版厚が厚いほど版底面における高引張応力域での発生頻度は小さくなる一方で、低引張応力領域における発生頻度は大きくなる。そのため、一概に版厚が厚くなるほど疲労度は小さくなるとは確定できない可能性もあると考えられる。また、頻度のピークとしては、各版厚とも低圧縮応力域 ($-1\sim 0\text{N/mm}^2$) でピーク値を示す。

版表面については、版中央部・版縁部ともに、版底面とは逆に、版厚が厚くなるほど、引張応力の最大値は大きくなる傾向を示す。また、頻度のピークとしては、圧縮域でピークを示していた版底面とは異なり、各版厚とも引張応力域でピーク値を示している。従来の疲労度設計においては、航空機荷重応力は版底面で最大値を示すため、温度応力についても重ね合わせた際にクリティカルとなる版底面のみを考慮していた。しかし、上記のように版表面は引張応力域における温度応力の発生頻度が大きいため、疲労度にも影響を及ぼす可能性があると考えられる。

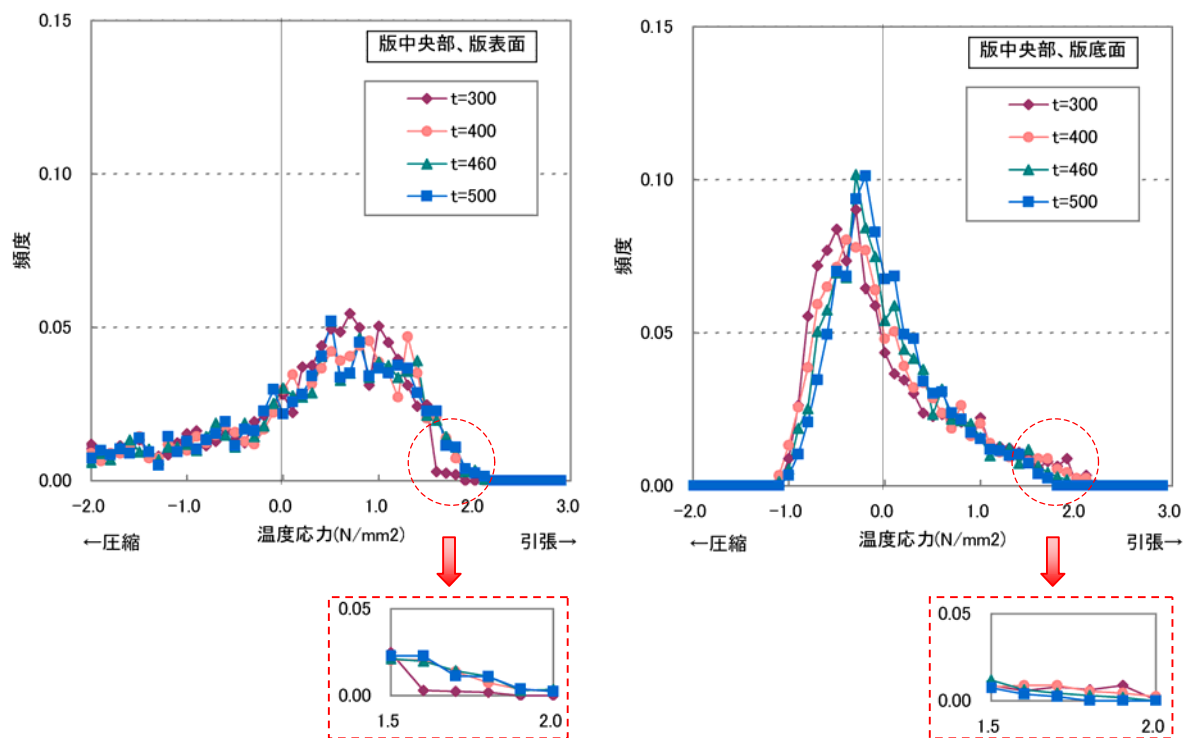


図 5-7 版中央部における各版厚毎の温度応力頻度分布（左：版表面、右：版底面）

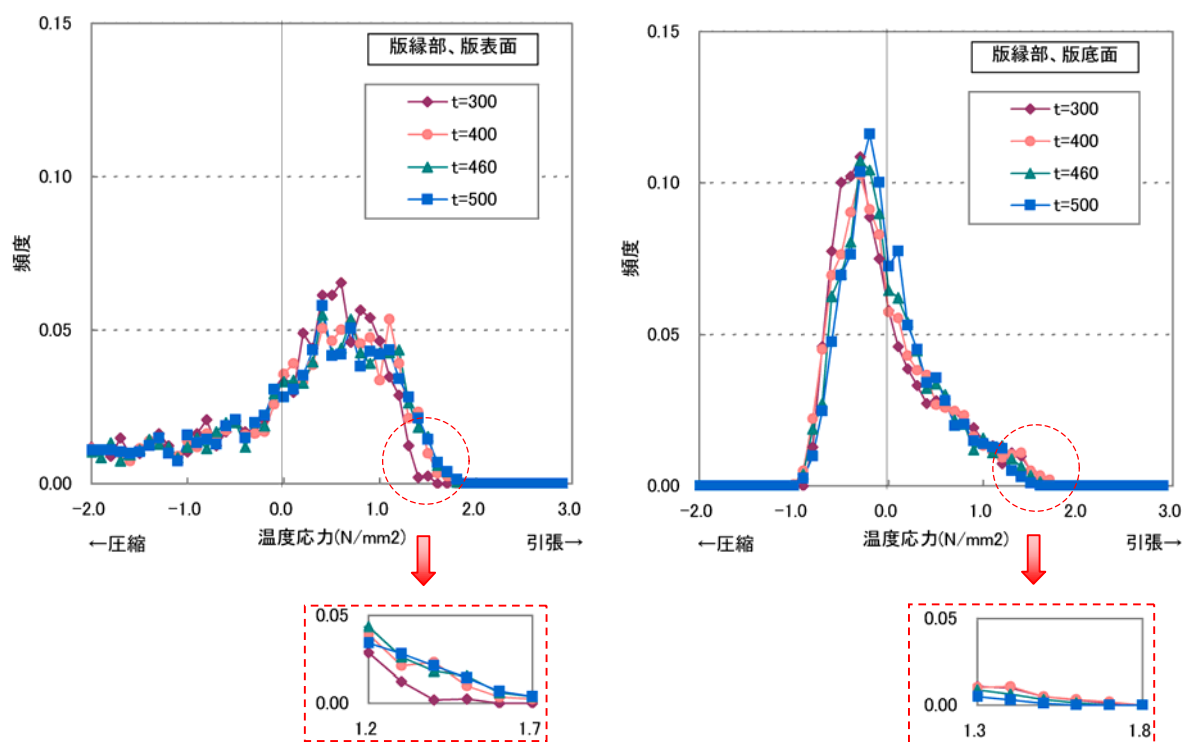


図 5-8 版縁部における各版厚毎の温度応力頻度分布（左：版表面、右：版底面）

5.3.4. 時間帯を考慮した温度応力頻度分布の算定

5.3.2 および 5.3.3 においては、1 年間分の温度応力に対して単純に 5.3.1 に示す方法により、温度応力の頻度分布を算定した。しかし、温度応力は時刻によって変化し、航空機荷重が作用する時刻との組み合わせによって疲労度に及ぼす影響は異なると考えられる。そのため、実際の空港コンクリート舗装版に対する疲労度設計においては、航空機荷重が作用する時刻による影響も考慮する必要がある。そこで、本研究では、時間帯を考慮した温度応力の頻度分布を算定し、疲労度設計に反映する方針とした。時間帯の区分としては、航空機の交通量が多い昼間の時間帯として 7～22 時を設定し、航空機の交通量が少ない、もしくは全くない夜間の時間帯として 23～6 時を設定した。図 5-9 および図 5-10 に時間帯毎の温度応力頻度分布の各版厚毎の算定結果を示す。

版底面については、版中央部・版縁部ともに、7 時～22 時の間に引張応力の殆どが発生し、23 時～6 時の間には圧縮応力の発生が支配的である。このことから疲労度を算定する際に、版底面については 23 時～6 時に発生する温度応力は疲労度に殆ど影響しないと考えられる。

一方で、版表面については、版中央部・版縁部ともに、23 時～6 時の間には引張応力しか発生しない。7 時～22 時の間には圧縮応力と引張応力の両方が発生している。このことから疲労度を算定する際に、版表面については 7～22 時のみならず 23～6 時に発生する温度応力も考慮する必要がある。

上記のように、温度応力は時刻によって変化するため、時間帯によって温度応力の頻度分布は大きく異なる。したがって、航空機荷重が作用する時刻が、コンクリート舗装版の疲労度設計へ及ぼす影響も大きいと考えられる。そこで、次章においては、ある仮定条件のもと、コンクリート舗装版に生じる疲労度を算定し検証を行う。

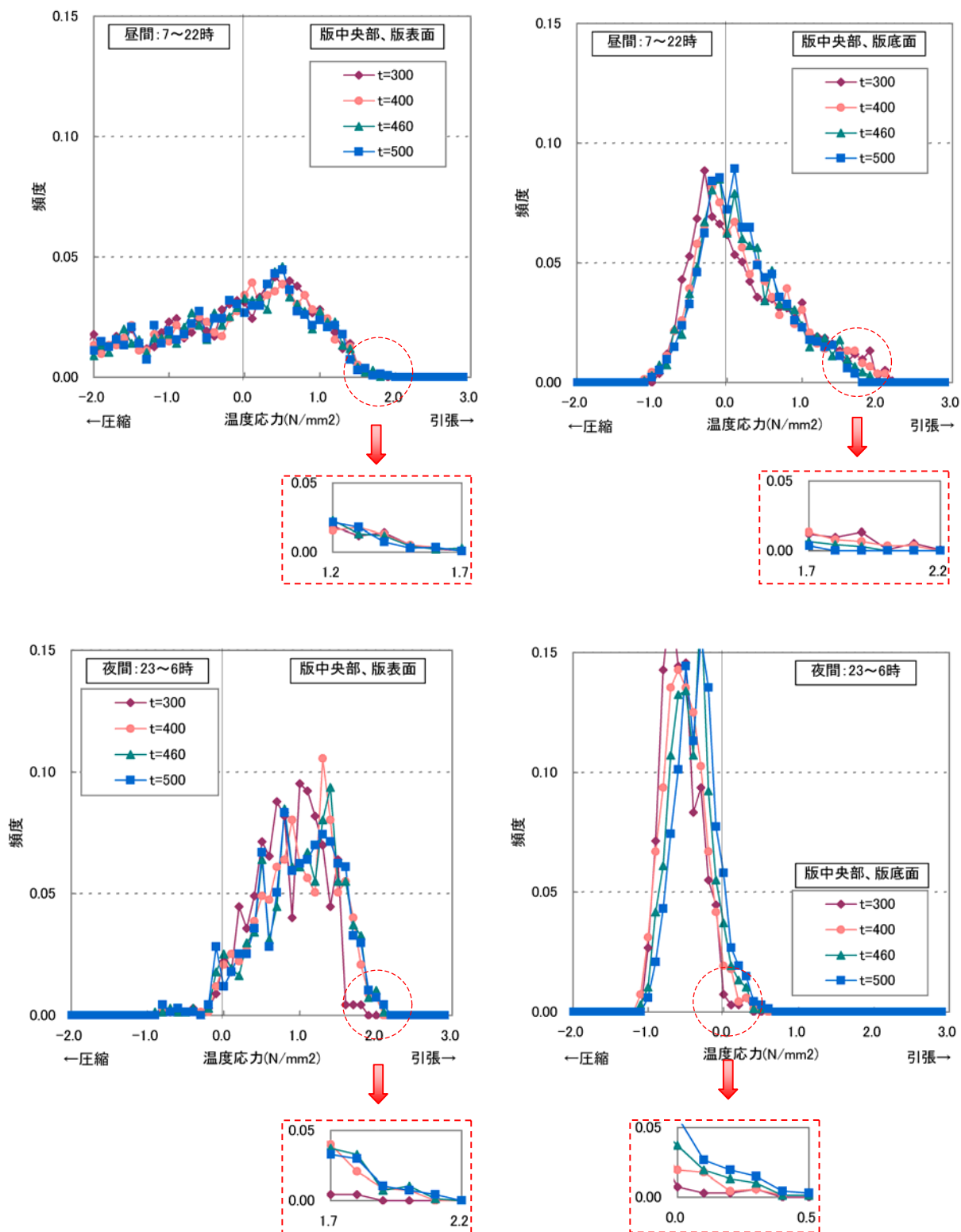


図 5-9 時間帯を考慮した版中央部における各版厚毎の温度応力頻度分布 (その 1)

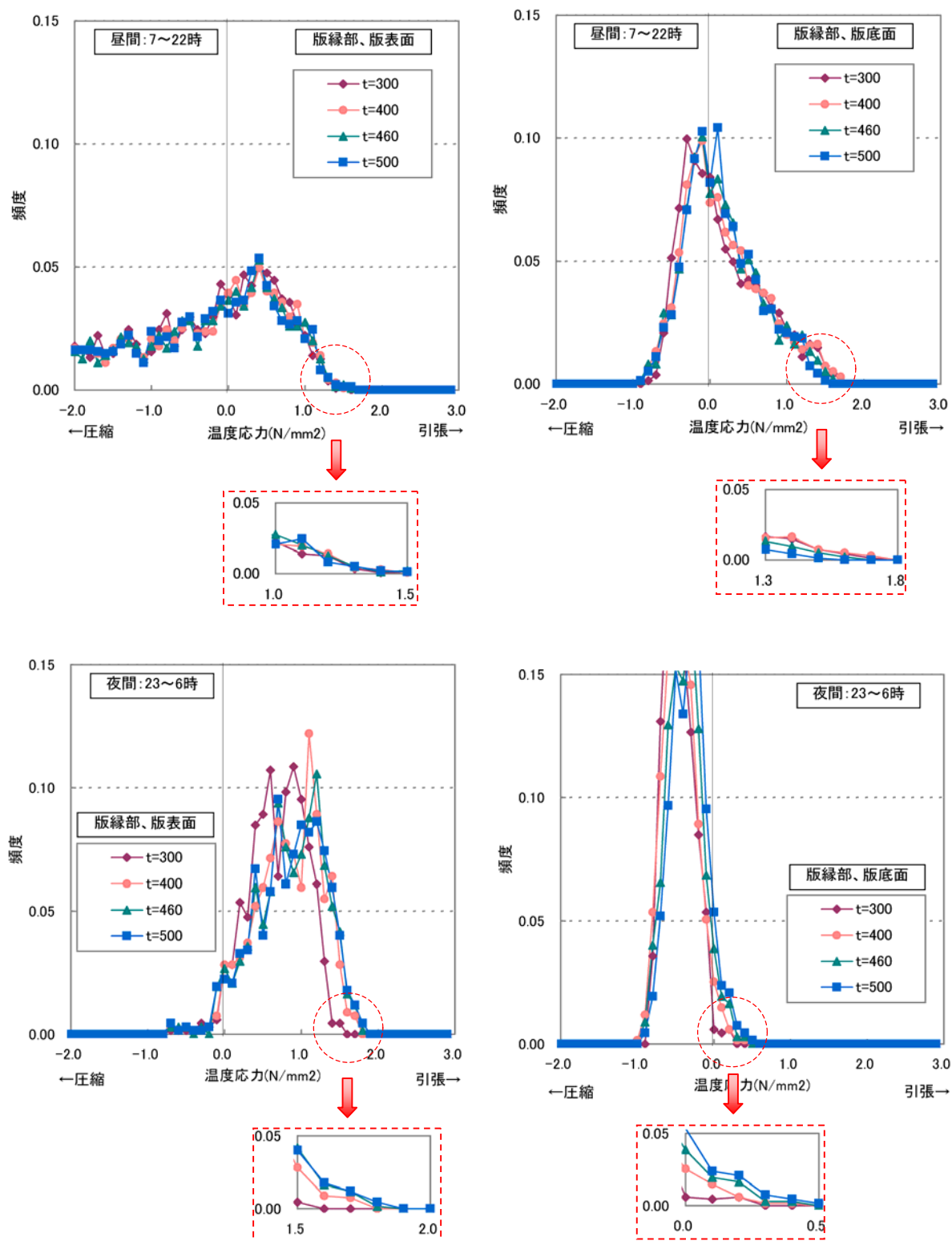


図 5-10 時間帯を考慮した版縁部における各版厚毎の温度応力頻度分布 (その 2)

5.4. 疲労度の算定

ここでは、5.2.2 に示した疲労度算定手法を用いて、各版厚毎の疲労度を算定する。その際の設計条件としては、以降に示すように実際の空港コンクリート舗装の設計条件を考慮したうえで設定したものを用いる。

5.4.1. 設計条件

(1) 空港の利用形態

疲労度算定において想定する空港の利用形態として、近年の空港の利用状況を考慮して表 5-2 に示すように、夜間利用をせず昼間のみ供用される場合・夜間も供用される場合の 2 ケースを設定し、各々のケースの疲労度を算定する。

表 5-2 疲労度算定において想定する空港の利用形態

昼間のみ供用	空港が昼間のみ供用され、夜間利用しない場合
昼夜供用	空港が昼夜供用される場合

(2) 設計対象航空機

本研究における疲労度設計では、設計対象航空機として B747-400 を対象とした。荷重諸元及び各航空機の脚配置を、表 5-3 及び図 5-11 に示す^[4]。

表 5-3 設計対象航空機と荷重諸元

航空機の種類		J クラス B747-400
脚荷重 (kgf)	離陸	92,794
	着陸	67,018
輪荷重 (kgf)	離陸	23,199
	着陸	16,755
接地圧 (kgf/cm ²)		14.07
接地面積 (cm ²)	離陸	1,649
	着陸	1,191
接地幅 (cm)	離陸	33.7
	着陸	28.6
接地長 (cm)	離陸	48.9
	着陸	41.6
接地半径 (cm)	離陸	22.9
	着陸	19.5

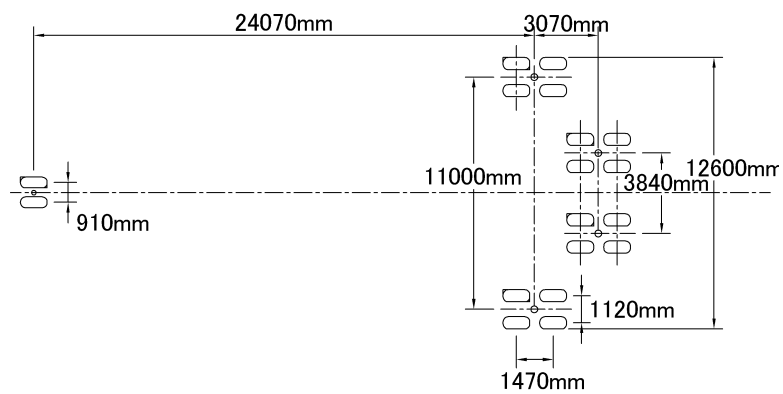


図 5-11 設計対象航空機脚配置 (B747-400)

(3) 航空機荷重載荷位置

航空機荷重載荷位置としては、図 5-12 に示すように、コンクリート舗装版中央部および版縁部載荷の 2 ケースを設定した。

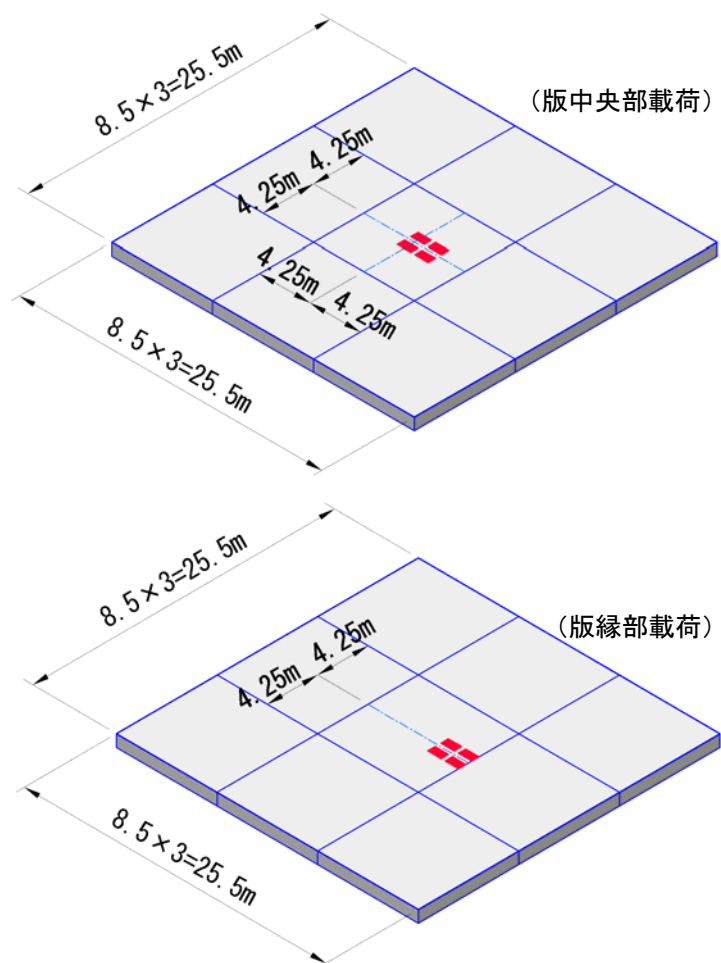


図 5-12 航空機荷重載荷位置

(4) 評価測線位置

疲労度を算定する際の評価測線としては、発生応力が最も大きくなる測線を航空機荷重載荷位置毎に設定した。つまり、版中央部載荷の場合は版中央の測線での疲労度を、版縁部載荷の場合は版縁部の測線での疲労度を算定する。図 5-13 に評価測線位置を示す。

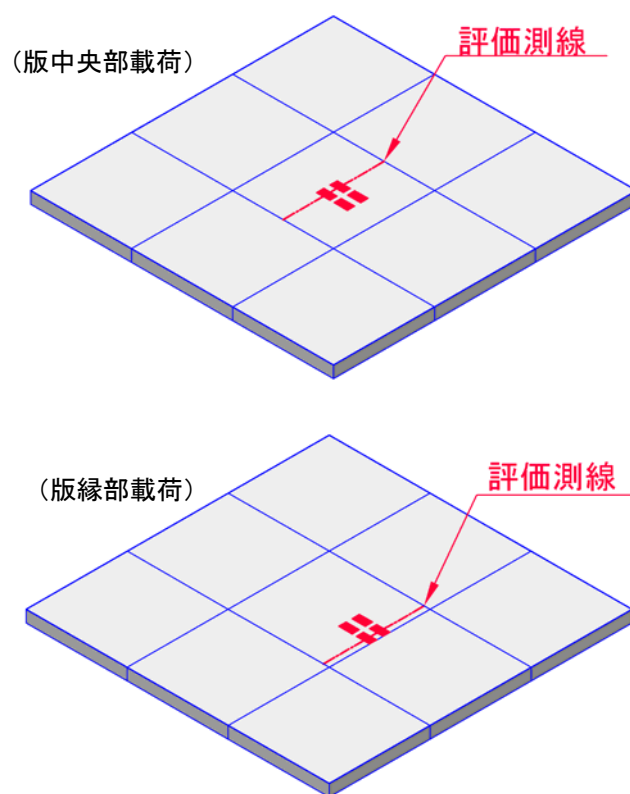


図 5-13 評価測線位置

(5) 破壊確率

設計に適用する信頼性については、1)疲労破壊輪数や舗装計画交通量に対して信頼度に応じた係数を適用する方法^{[8][9]}、2)地盤・材料の強度などに信頼度に応じた係数を適用する方法^{[10][11]}が提案されている。また、求められるサービスレベルの水準により、信頼度を設定することが必要となる^[3]。本研究においてはコンクリート材料の疲労強度に着目し、適切な破壊曲線を設定することで信頼性を確保する方針とした。小梁川ら^[9]は、コンクリート材料の疲労破壊試験より求められる破壊確率 30%の破壊基準を用いて設計した舗装が、疲労度 1.0 となったときに 30%破壊すると報告している。

対象とするコンクリート舗装が空港コンクリート舗装の場合、コンクリート舗装の疲労耐久性が損なわれサービス水準が低下した場合に、施設を長時間にわたり閉鎖して大規模補修を実施することは多大な経済損失を招く恐れがある。このため、空港コンクリート舗装にはより高い信頼

性を確保することが望まれる．そこで，本研究では，(式 5-2)において破壊確率 10%を設定し，許容繰り返し回数 $N_{allowable}$ を算定する方針とした．

(6) 設計交通量

設計供用年数として 20 年を設定し，この期間において空港コンクリート舗装の荷重支持性能，特に疲労耐久性を十分に確保するものとする．本研究では，設計交通量としては，表 5-2 に示す各ケースに対して下記のように設定した．

空港が昼間(7～22 時)供用されるのみであり，年間交通量として 50,000 回を設定した

- ・ 空港が昼夜供用されるものとし，昼と夜の交通量の比率を 6:4 とする．ただし，もともと昼間のみ供用された空港が夜間も増便した状況を想定し，昼間の交通量は昼間のみ供用された場合と同一となるよう全交通量を調整した．そのような仮定を基に，昼夜供用された場合の年間交通量として 80,000 回(昼間：80,000×0.6=48,000 回，夜間：80,000×0.4=32,000 回)を設定した

表 5-4 に，各ケースの年間交通量及び 20 年間に相当する設計交通量を示す．

表 5-4 設計交通量

ケース		年間交通量	設計交通量(20 年間)
昼間のみ供用	昼間	50, 000	1000, 000
	夜間	—	—
昼夜供用	昼間	48, 000	960, 000
	夜間	32, 000	640, 000

5.4.2. 航空機荷重応力の算定

(1) 解析モデル

従来，コンクリート舗装版の設計の際に必要な航空機荷重応力は，地盤をモデル化した平板問題の解に基づいて行われており，その代表的なものとして Westergaard が導いた公式がある^[12]．これは地盤を Winkler 基礎に仮定して平板の微分方程式を解いたものである．しかし，Winkler 基礎は地盤をばねの集合と考えており，地盤自体がもつ荷重分散能力を考慮できない．そこで，このような地盤の荷重分散能力を考慮したモデルは弾性基礎と呼ばれ，その数学的な記述は Boussinesq の解として知られている．弾性基礎を仮定して平板の微分方程式を解いたのは Hogg^[13]であり，コンクリート版の中央部に荷重が作用した場合の応力及びたわみを求めている．また，Pickett や Ray^[14]は，任意の分布形や任意の数の荷重によるコンクリート版のモーメント及びたわみを計算できるように一連の影響図を作成した．

しかしながら，以上の方法は微分方程式の理論解に基づくもので，コンクリート舗装に特有な

目地等の不連続な構造条件や、目地付近に荷重が作用する場合のような荷重条件を考慮することは不可能に近い。一方で、大型電子計算機を用いた構造解析手法が急速に発展し、複雑な構造物の挙動の解析が可能となっている昨今、目地等の構造条件を含めてコンクリート舗装版を解析する手段として有限要素法による数値解析が多く提案されている^[15]。そこで、本研究では4章で示した温度応力の算定と同様に西澤らが開発した 3DFEM プログラムパッケージ^[16]を用いて、航空機荷重応力の算定を行うこととした。3DFEM では、地盤もモデル化できるため、より正確な応力の算定が可能となる。3DFEM による航空機荷重応力算定の一例を図 5-14 に示す。

FEM 解析モデルとしては、図 5-15 に示すように、ダウエルバーによる荷重伝達を的確に評価するために9枚版を基本とし、1枚のコンクリート版の形状は8.5m×8.5mを標準とした。要素分割幅については、版厚・車輪設置幅及び目地間隔を考慮して概ね25cm程度とした。また、FEM 解析定数としては、4.3に示す各層の物性値を用い、目地部・ダウエルバー等の物性値については、表 5-5 に示す値を用いる。

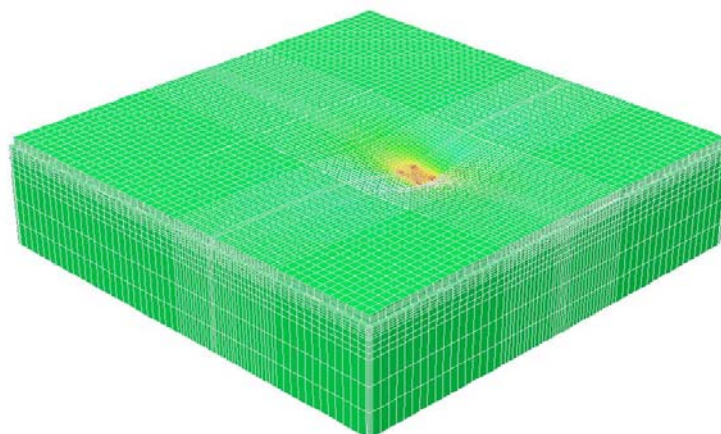


図 5-14 3DFEM による航空機荷重応力算定の一例（版縁部載荷の場合）

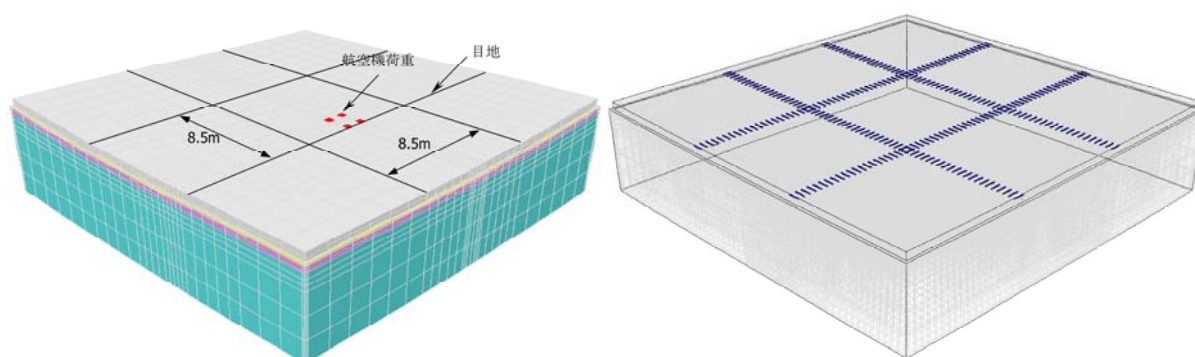


図 5-15 FEM 解析モデル(左：9枚版モデル，右：ダウエルバー配置)

表 5-5 FEM 解析定数

定数		設定値	単位	備考
目地	せん断バネ定数	500	MPa	
	曲げバネ定数	0	kN/m	
	ねじりバネ定数	0	kN/m	
ダウエルバー	弾性係数	205,940	MPa	コンクリート標準示方書
	ポアソン比	0.3	—	コンクリート標準示方書
	直径	4.2	cm	舗装設計要領
	長さ	80.0	cm	舗装設計要領
	コンクリート支持力係数	4,000	MPa	
	目地幅	1.0	cm	舗装設計要領
	間隔	40.0	cm	舗装設計要領

(2) 航空機載荷位置の頻度

空港コンクリート舗装版内に生じる応力を算定する際に航空機荷重を考慮するが、航空機が必ずしも定常的に同じ走行位置を通過するわけではない。航空機が i 点を走行する交通量は、航空機の横断方向の走行分布が正規分布であるとして、次式により算定する。図 5-16 に航空機の横断方向走行分布と交通量の算定方法を示す。

$$\begin{aligned}
 n(i) &= n_{air} \times f_i \\
 &= n_{air} \times \left[\int_{s(i-1/2)}^{s(i+1/2)} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx \right] \quad (\text{式 5-5})
 \end{aligned}$$

ここに、

n_{air} : 機材別全交通量

f_i : 航空機が i 点を走行する頻度

s : FEM 解析における載荷位置のインターバル（微小メッシュの一辺に相当）

σ : 横断方向標準偏差

本研究では、航空機の横断方向の走行分布は標準偏差 σ を 90cm として正規分布するものと仮定した。また、図 5-17 に示すように航空機荷重は、9 枚版の中心位置を基準として、 x 方向に 7 箇所の位置に分布するものとした。そのときの各々の位置に航空機荷重が載荷される頻度は、(式 5-5)に基づき表 5-6 のようになる。

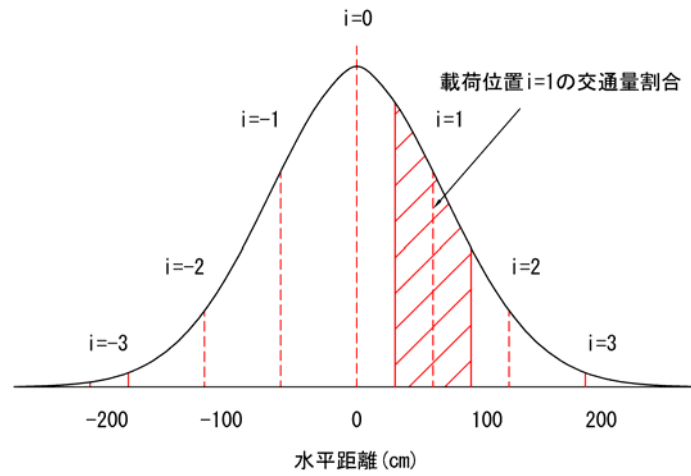


図 5-16 航空機の横断方向走行分布と交通量の算定方法

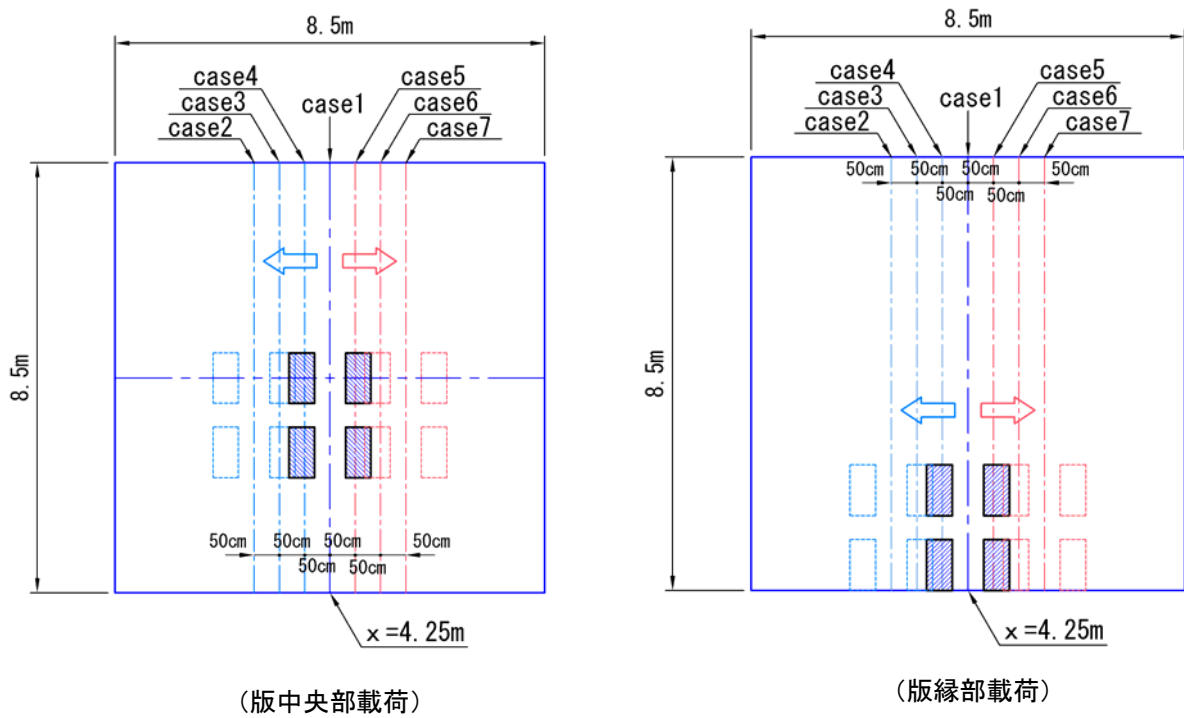


図 5-17 航空機荷重の载荷位置分布

表 5-6 各々の位置における航空機荷重の頻度

Case	x (cm)	頻度 f_i
Case1	425	0.20
Case2	275	0.08
Case3	325	0.14
Case4	375	0.18
Case5	475	0.18
Case6	525	0.14
Case7	575	0.08

(3) 航空機荷重応力分布

図 5-18 に版中央部載荷時の航空機荷重応力分布を、図 5-19 に横目地縁部載荷時の航空機荷重応力分布を示す。各結果とも、Case1～Case7 のどの位置に載荷したとしても、コンクリート舗装版に生じる応力の最大・最小値は同様の値となり、形状も同様のものとなることが分かる。

どの版厚の結果においても、版表面・版底面に生じる応力は、横目地縁部載荷時の方がわずかに大きい値を示している。4.7 に示したように温度応力は版中央部の方が版縁部よりも大きくなるのとは逆に、航空機荷重により生じる応力は版縁部が大きくなる。

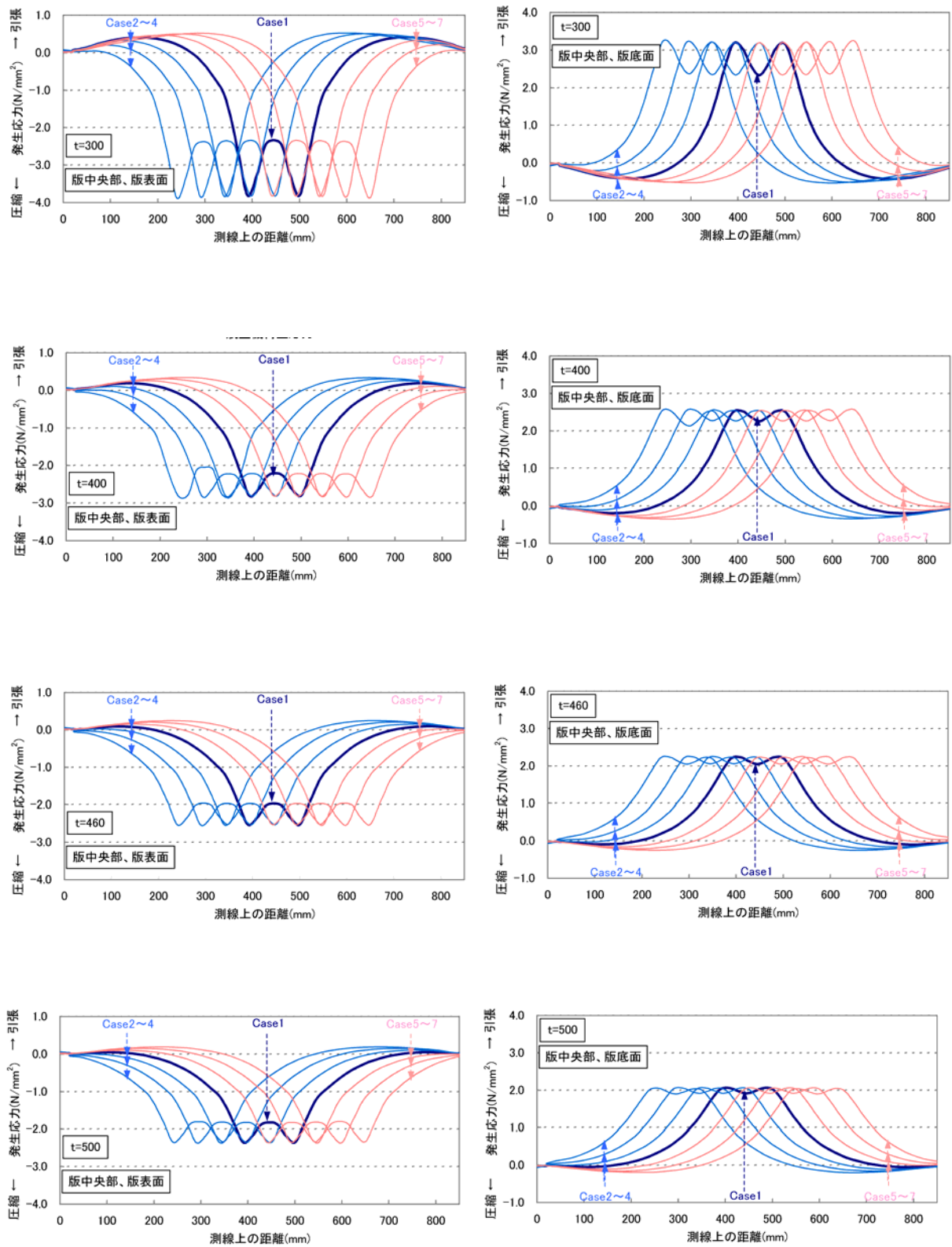


図 5-18 版中央部載荷時の航空機荷重応力分布（左：版表面、右：版底面）

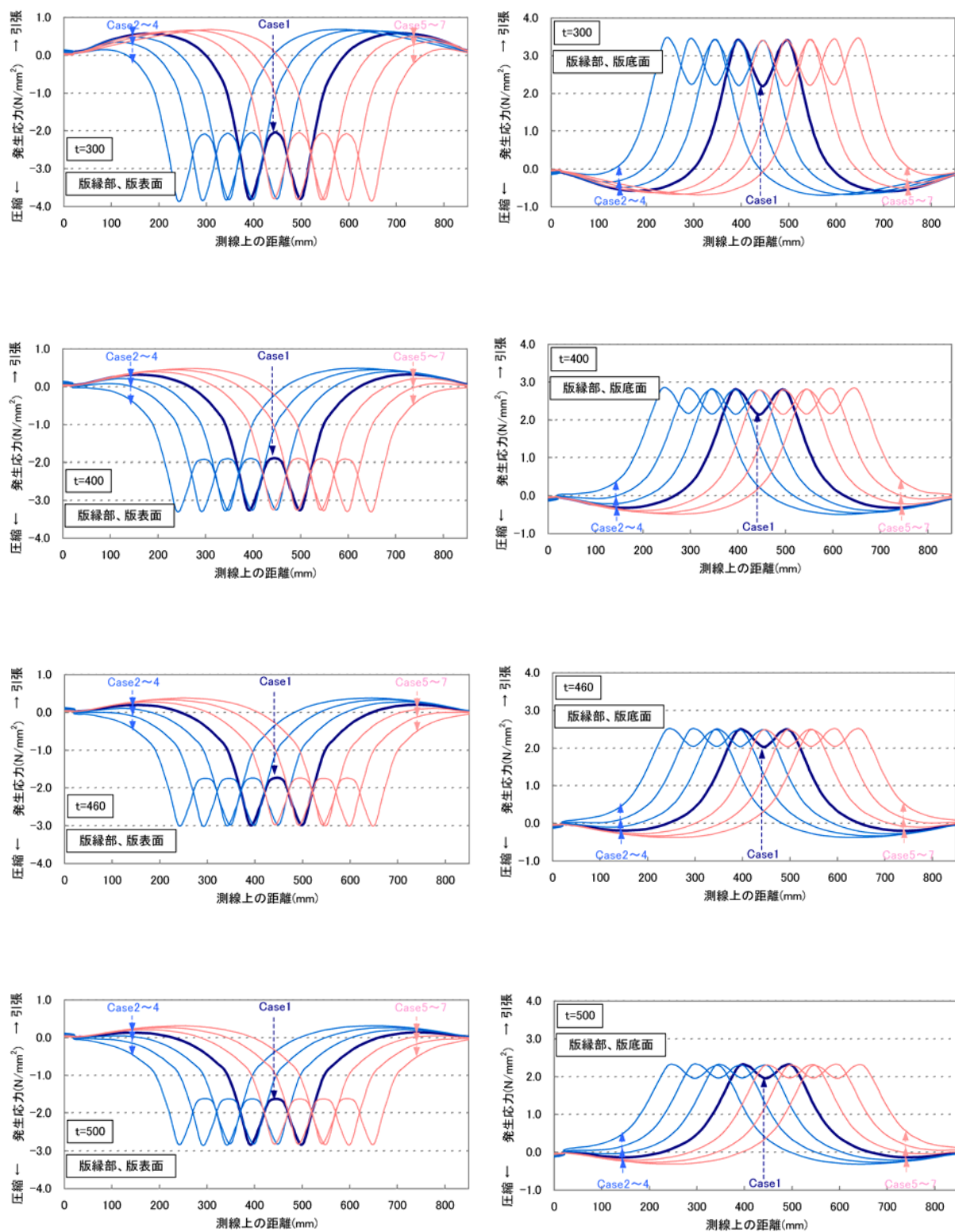


図 5-19 版縁部載荷時の航空機荷重応力分布（左：版表面、右：版底面）

5.4.3. 温度応力頻度分布

本研究では、疲労度の算定において用いる温度応力頻度分布は、図 5-9 および図 5-10 に示す時間帯を考慮した温度応力頻度分布とした。

表 5-2 に示す空港の利用形態の各ケースに対して、空港が昼間のみ供用される場合は、航空機交通量に対して昼間：7～22 時の温度応力頻度分布を用いた。空港が昼夜供用される場合は、昼間の航空機交通量に対しては、昼間：7～22 時の温度応力頻度分布を、夜間の航空機交通量に対しては、夜間：23～6 時の温度応力頻度分布を用いた。

また、図 5-12 に示す航空機荷重載荷位置の各ケースに対しては、版中央部に航空機荷重が載荷される場合は版中央部の温度応力頻度分布を、版縁部に航空機荷重が載荷される場合は版縁部の温度応力頻度分布を用いた。

空港の利用形態および航空機荷重載荷位置の各ケースに対して用いた温度応力頻度分布を整理したものを表 5-7 に示す。

表 5-7 各ケース毎に用いる温度応力頻度分布

空港の利用形態	航空機荷重載荷位置	温度応力頻度分布
昼間のみ供用	版中央部載荷	・ 昼間 (7 時～22 時) の航空機交通量に対して、 昼間の版中央部温度応力頻度分布を考慮
	版縁部載荷	・ 昼間 (7 時～22 時) の航空機交通量に対して、 昼間の版縁部温度応力頻度分布を考慮
昼夜供用	版中央部載荷	・ 昼間 (7 時～22 時) の航空機交通量に対しては、 昼間の版中央部温度応力頻度分布を考慮 ・ 夜間 (23 時～6 時) の航空機交通量に対しては、 夜間の版中央部温度応力頻度分布を考慮
	版縁部載荷	・ 昼間 (7 時～22 時) の航空機交通量に対しては、 昼間の版縁部温度応力頻度分布を考慮 ・ 夜間 (23 時～6 時) の航空機交通量に対しては、 夜間の版縁部温度応力頻度分布を考慮

5.4.4. 疲労度算定結果－版厚毎の比較

版厚 300mm、400mm、460mm、500mm のコンクリート舗装版に対する疲労度算定結果を図 5-20～図 5-21 に示す。版底面の疲労度算定結果を図 5-20 に、版表面の疲労度算定結果を図 5-21 に示す。

いずれの結果も版厚が厚くなるほど、疲労度は小さくなっている。これは、版厚が厚くなるほど、航空機荷重により生じる最大応力および最大温度応力ともに小さくなるためである。5.3.3 において版厚が厚くなるほど、高引張応力域の温度応力の発生頻度は小さくなるものの低引張応力域では大きくなることが確認されたが、この疲労度の算定結果から、低引張応力域の影響はそれほど大きくないことが分かる。

版底面の疲労度算定結果（図 5-20）において、空港の利用形態として昼間のみ供用された場合と昼夜供用された場合を比較してみると、版中央部・版縁部とも疲労度に殆ど違いがないことが分かる。これは、5.3.4 の時間帯を考慮した温度応力頻度分布の算定において示されたように、夜間において版底面には圧縮応力の発生が支配的であり、引張応力は殆ど生じていないことに起因する。つまり、夜間に航空機の交通量が増大したとしても、航空機荷重応力による引張応力は生じるものの、温度による引張応力が夜間では殆ど生じないため、疲労度には寄与しないためと考えられる。

版底面の版中央部と版縁部の疲労度を比較してみると、各版厚とも版中央部の方が版縁部に対して、疲労度は大きい値を示している。5.4.2 における航空機荷重により生じる応力は版縁部の方が版中央部に対して大きいものの、4.7 に示したように温度応力については版中央部の方が版縁部に対して大きいことに起因すると考えられる。このように、コンクリート舗装版の疲労度に対して、温度応力は航空機荷重応力と同等以上の影響を及ぼすことが分かる。

版表面の疲労度算定結果（図 5-21）については、版底面と比較すると、疲労度は極端に小さい。4.7 に示したように版表面の温度応力の値は版底面と比較して若干小さくなる程度であったため、特に 5.3.4 に示したように版表面の温度による引張応力が高い頻度で生じる夜間においては、疲労度が大きくなる可能性がある。確かに、昼間のみ供用された場合と比較すると、昼夜供用された場合は、各版厚とも疲労度が大きくなっているが、両者とも疲労度は非常に小さい。これは、版表面に生じる航空機荷重応力が非常に小さいため、温度応力を重ね合わせたとしても、合成応力としては小さく、疲労度は大きくはならなかったためである。したがって、疲労度設計においては、版表面の疲労度がクリティカルになることはないと考えられる。

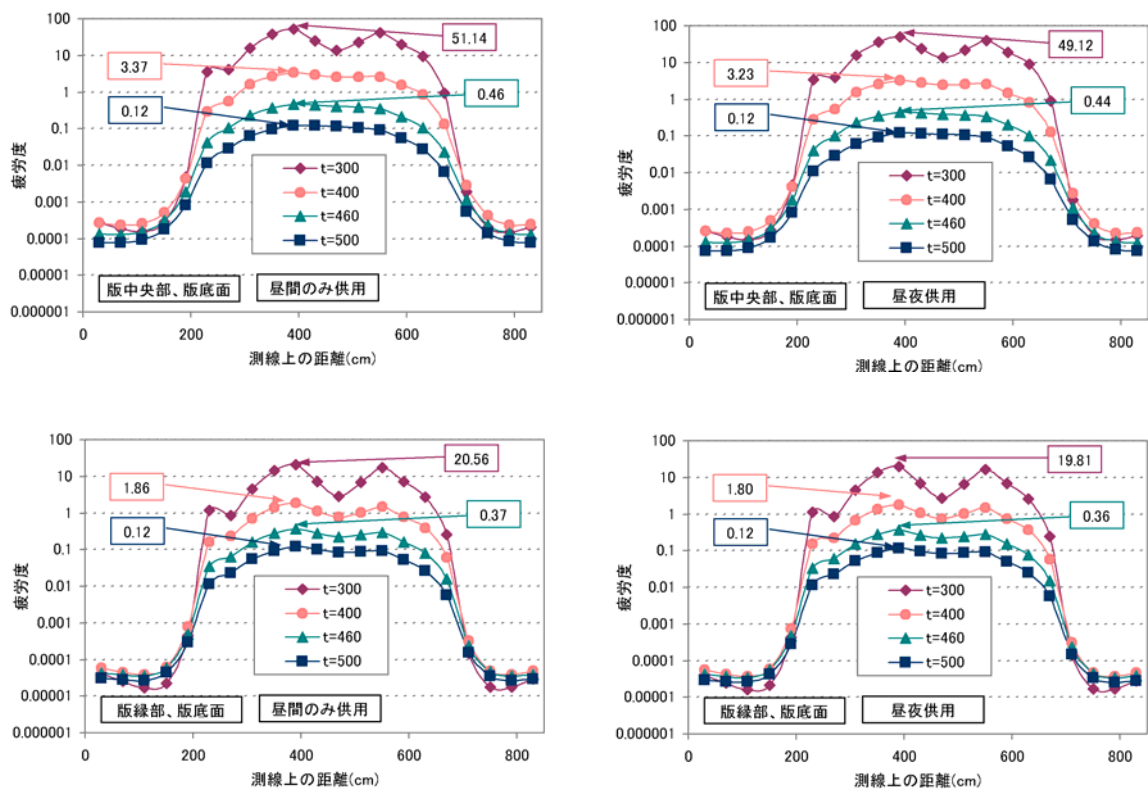


図 5-20 版底面の疲労度算定結果（左：昼間のみ供用、右：昼夜供用）

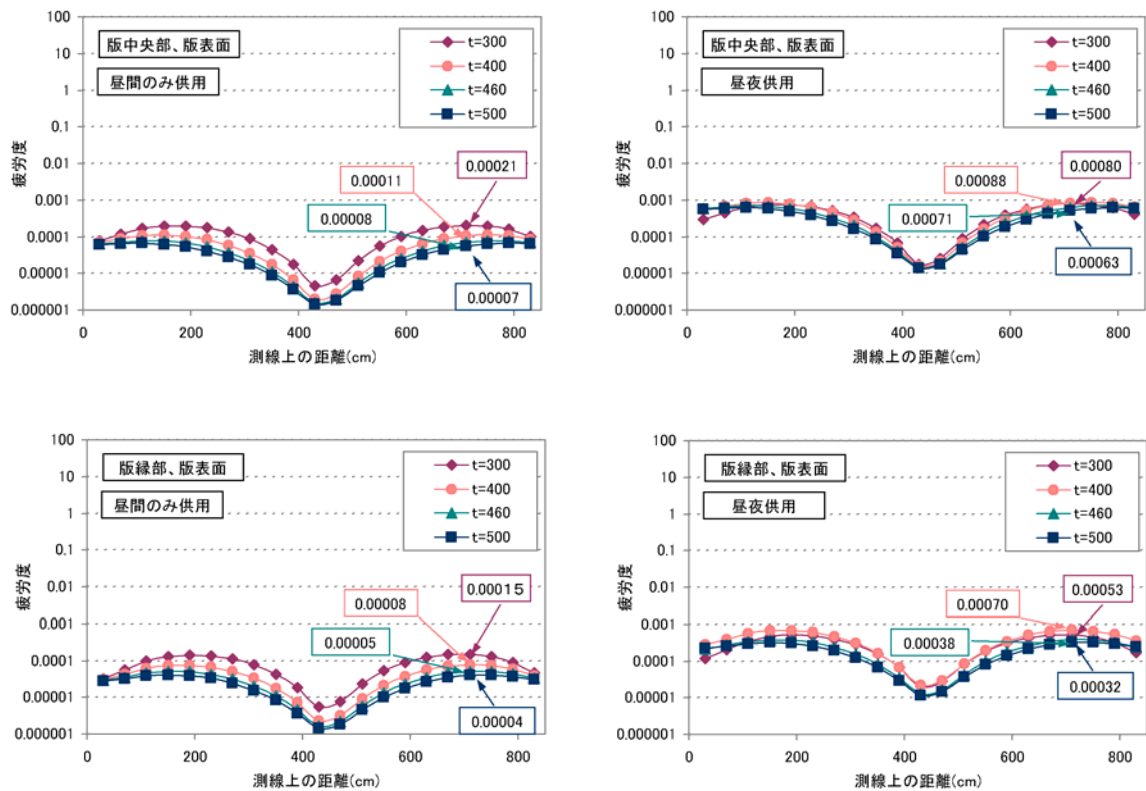


図 5-21 版表面の疲労度算定結果（左：昼間のみ供用、右：昼夜供用）

5.4.5. 疲労度算定結果－温度応力の算定手法毎の比較

温度応力の算定手法毎の疲労度算定結果を比較したものを図 5-22 に示す．なお，ここでは，疲労度が最も大きくなるケースである昼夜供用した場合の版底面の疲労度算定結果を示している．また，岩間の提案式および坪川の提案式で算定された温度応力の頻度分布についても，5.4.3 と同様に時間帯を考慮した温度応力頻度分布を算定し，疲労度の算定において用いている．

版中央部の各版厚の疲労度算定結果を比較してみると，4.9 に示した各算定手法の最大温度応力の大小関係と同様の傾向を示していることが分かる．つまり，版厚 300～400mm では 3DFEM による温度応力を用いた疲労度は，岩間の提案式による温度応力を用いた疲労度と同程度の値となり，坪川の提案式による温度応力を用いた疲労度に対しては大きい値となる．一方で，版厚 460～500mm では 3DFEM による温度応力を用いた疲労度は，岩間の提案式による温度応力を用いた疲労度に対しては小さい値となり，坪川の提案式による温度応力を用いた疲労度に対しては同程度の値を示している．このように，3DFEM による温度応力を用いた疲労度に対して，版厚が薄い場合は坪川の提案式による温度応力を用いると小さく評価，版厚が厚い場合は岩間の提案式による温度応力を用いると大きく評価していることが分かる．

版縁部については，版中央部と同様の傾向を示している．しかし，版厚 460～500mm において，版中央部ほど 3DFEM による温度応力を用いた疲労度と，岩間の提案式による温度応力を用いた疲労度の差異は大きくない．これは，4.9 にも示したように，本研究での岩間のコンクリート舗装版縁部におけるそり拘束度 C_w の設定に起因するものと考えられる．

また，この版厚 300mm，400mm，460mm，500mm のコンクリート舗装版に対する疲労度算定結果から，疲労度と版厚の関係を示したものを図 5-23 に示す．また，疲労度と版厚の関係が近似曲線で表現できるものと仮定して，疲労度算定結果を近似曲線化したものもあわせて示している．疲労度が 1.0 となる版厚は，3DFEM による温度応力を用いた場合は 430mm，岩間の提案式による温度応力を用いた場合は 470mm，坪川の提案式による温度応力を用いた場合は 380mm と，温度応力の算定手法によって大きく異なることが確認された．特に，従来用いられてきた岩間の提案式を用いた場合に対して，3DFEM により算定した温度応力を用いた場合は，版厚を 40mm 低減できることが確認された．

最後に，これらの結果はあくまで，本研究において設定した条件の基で算定した疲労度に対し，版厚との関係を近似曲線化できるものと仮定して，疲労度が 1.0 となる場合の版厚を求めたものであることに注意されたい．

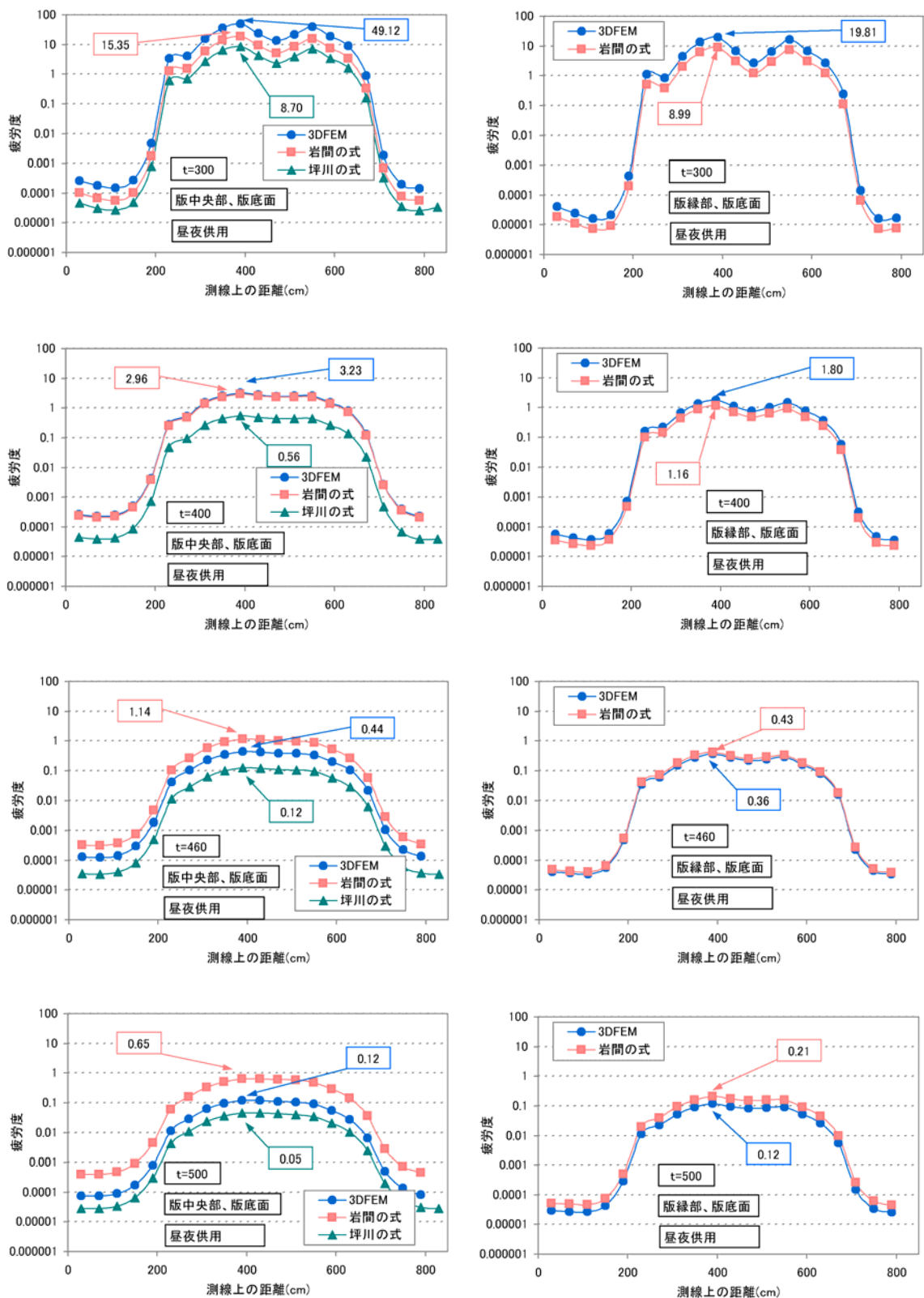


図 5-22 温度応力の算定手法毎の疲労度算定結果
(昼夜供用時一版底面、左：版中央部、右：版縁部)

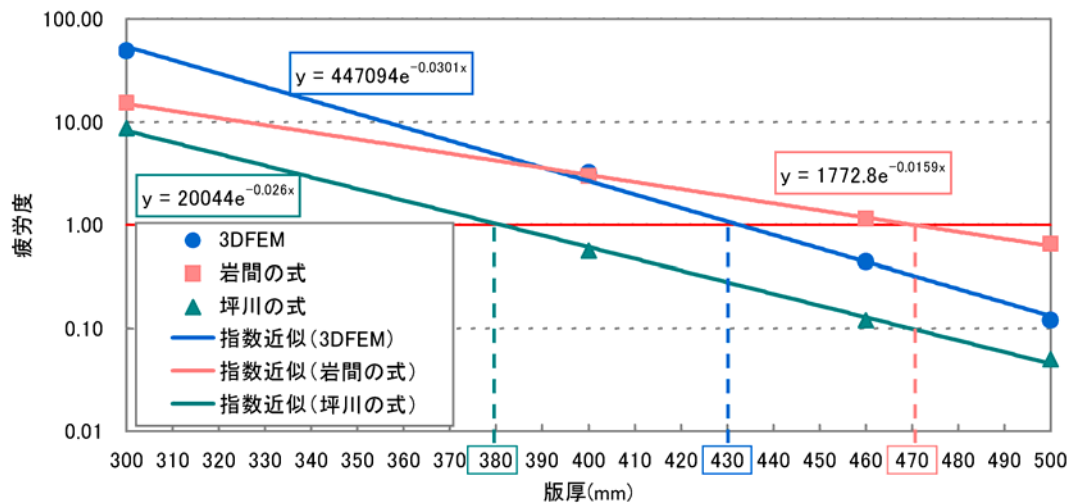


図 5-23 疲労度と版厚の関係

5.5. 今回提案手法による試設計

ここでは、上記に示した今回提案手法を用いて、気象条件の異なる国内のある2地点：福岡および札幌における空港コンクリート舗装版の試設計を行う。

5.5.1. 設計条件

(1) 気象条件

コンクリート舗装版が曝される気象条件として、気象庁の福岡および札幌の気温・湿度・風速・全天日射量の2008年のAMeDASデータを用いることとした。図5-24に、一例として福岡および札幌の気温の年間変動を示す。最高気温は福岡で36.7℃、札幌で31.1℃と5℃程度の差であったのに対して、最低気温は福岡で0.8℃、札幌で-12.8℃と12℃程度の大きな差異があった。

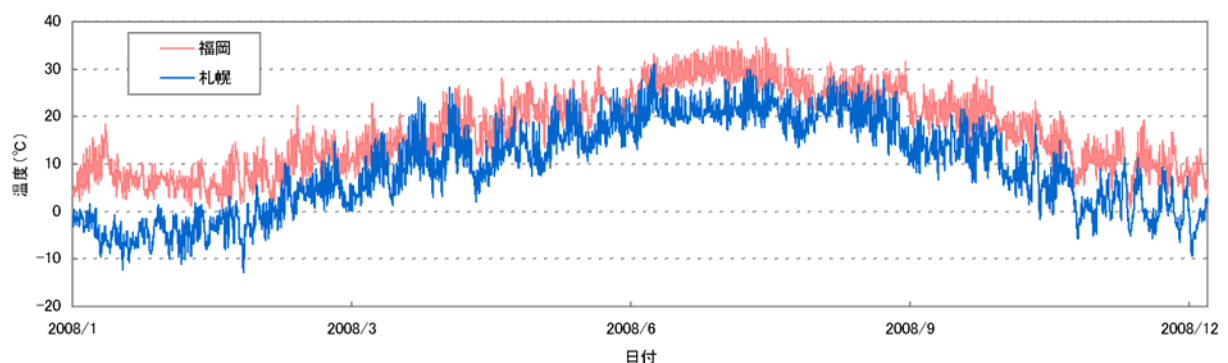


図 5-24 福岡および札幌の気温の年間変動

(2) 空港の利用形態

試設計における空港の利用形態として、表 5-2 における昼夜供用されるケースを設定した。

(3) 航空機荷重

試設計における設計対象航空機としては、5.4 と同様に、表 5-3 および図 5-11 に示す B747-400 を対象とした。また、航空機荷重載荷位置は版中央部載荷とし、航空機荷重応力は 3DFEM により算定することとする。

(4) 破壊確率

試設計における破壊確率は、5.4 と同様に、10% と設定した。

(5) 設計交通量

試設計における設計供用年数を 10 年と設定し、設計交通量は、昼と夜の交通量の比率を 6:4 とし、年間交通量として 40,000 回(昼間：40,000×0.6=24,000 回，夜間：40,000×0.4=16,000 回)を設定した。表 5-8 に設計交通量を示す。

表 5-8 設計交通量

ケース		年間交通量	設計交通量(10 年間)
昼夜供用	昼間	24,000	240,000
	夜間	16,000	160,000

5.5.2. 温度分布および温度応力

コンクリート舗装版の温度分布は 3.2 に示すように熱伝導解析により算定した。試設計においては、熱伝導解析を行うにあたり、コンクリート舗装版表面の境界条件を熱伝達境界としたが、その際の入力値としては、福岡および札幌における気温・湿度・全天日射量・風速の気象庁の AMeDAS データを用いた。なお、風速については、既往の研究^[17]において、舗装表面から 1m の位置の風速を用いて熱伝導解析を行うことにより、精度良く解析を行うことができることが確認されている。そこで、本研究においても、データが採取された場所での風速計の高さから下式^[17]より舗装表面から 1m の位置に変換した風速を用いることとした。

$$V_{1.0} = V_H \times \frac{3.790}{\ln(H/1.0) + 3.790} \quad (\text{式 5-6})$$

ここに、

$V_{1.0}$: 1m での高さの風速(m/s)

V_H : 高さ H(m)での風速(m/s)

H : 風速の測定されている高さ(m)

コンクリート舗装版の温度応力は、熱伝導解析により算定した温度分布を用いて、4.2～4.4に示すように3DFEMにより算定した。

図 5-25 および図 5-26 に、福岡および札幌での、版厚 350mm, 400mm, 450mm, 500mm の冬期（1 月）および夏期（8 月）における最大温度応力発生時のコンクリート舗装版中央部の版内温度分布および版内温度応力分布を示す。

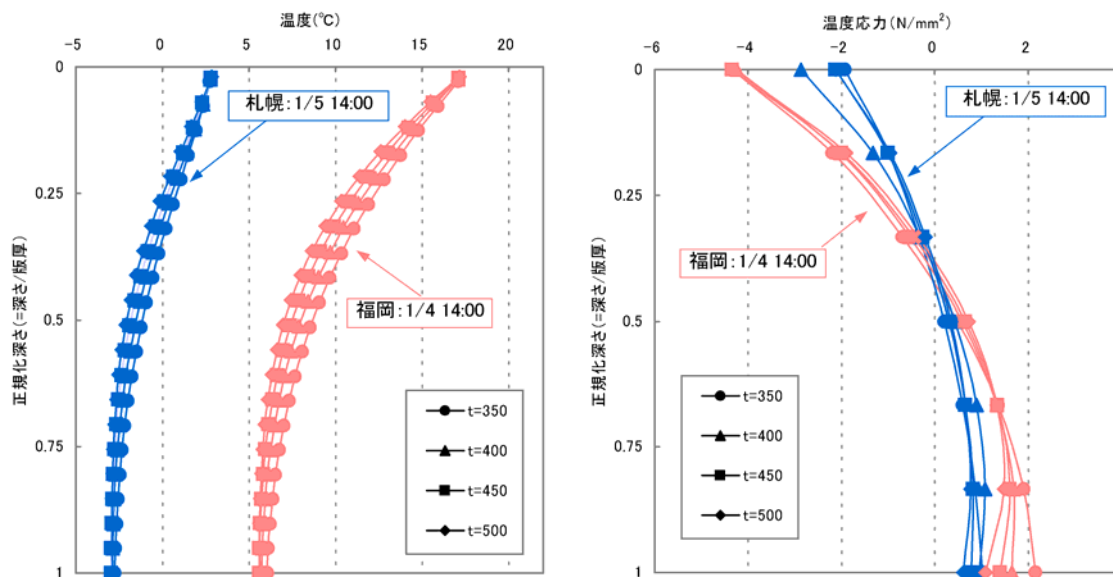


図 5-25 冬期（1 月）における最大温度応力発生時の版内温度分布および版内温度応力分布

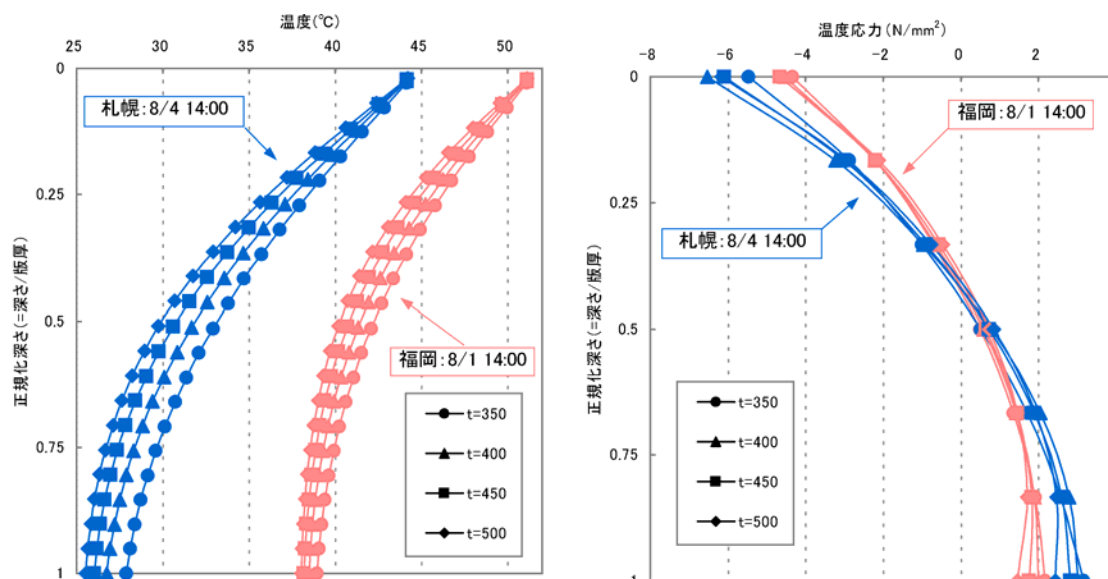


図 5-26 夏期（8 月）における最大温度応力発生時の版内温度分布および版内温度応力分布

いずれの結果も版厚が厚くなるほど版内温度分布の非線形性は大きくなり、版底面の温度応力は小さくなる傾向を示す。冬期（1 月）においては、版上下面温度差は札幌の方が福岡よりも小さく、そのため版底面の温度応力も札幌の方が小さい。一方で、夏期（8 月）においては、舗装版表面温度は気温の低い札幌の方が小さいが、版上下面温度差は札幌の方が福岡よりも大きい。したがって、版底面の温度応力は札幌の方が大きい値を示している。この結果は、気温が低かったとしても、版上下面温度差および版内温度分布によっては、必ずしも温度応力が小さくなるわけではないことを示している。版内温度分布の非線形性については、同じ版厚でも福岡と札幌で大きく異なり、季節によっても異なる。このように、今回提案手法を用いることで、様々な気象条件を考慮した版内温度分布・温度応力を算定することが可能であることが確認された。

5.5.3. 温度応力頻度分布

5.5.2 において求めた温度応力について、1 年間分の値を整理し、温度応力頻度分布を算定した。図 5-27 に、福岡および札幌の版厚 350mm, 400mm, 450mm, 500mm のコンクリート舗装版中央部-底面における温度応力頻度分布を示す。

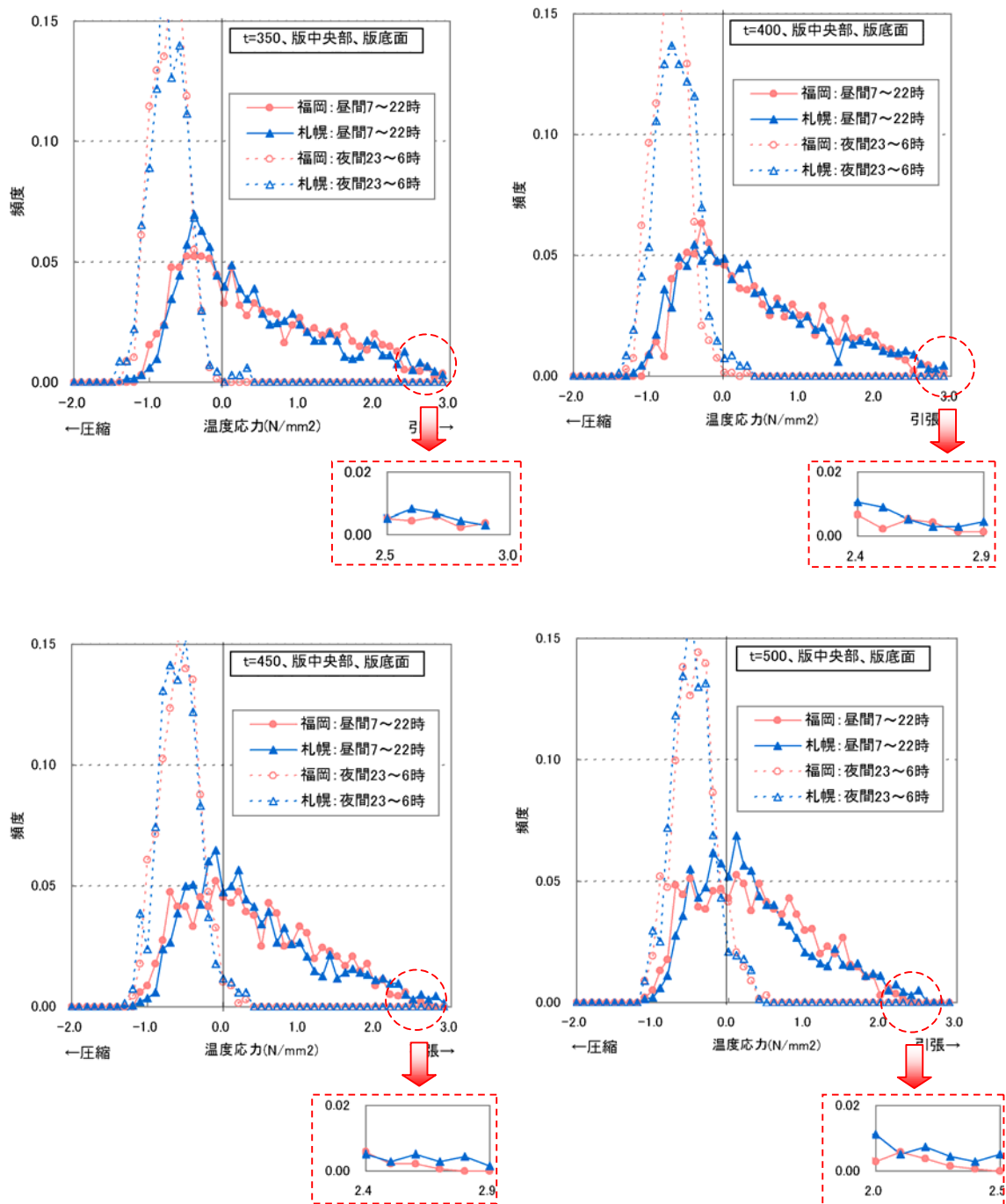


図 5-27 コンクリート舗装版中央部-底面における温度応力頻度分布

5.5.4. 疲労度算定結果

図 5-28 に、福岡および札幌の版厚 350mm, 400mm, 450mm, 500mm のコンクリート舗装版中央部-底面における疲労度算定結果を示す。また、この疲労度算定結果から、疲労度と版厚の関係を示したものを図 5-29 に示す。これは、5.4.5 と同様に、疲労度と版厚の関係が近似曲線で表現できるものと仮定して、近似曲線化したものである。

図 5-28 に示すように、全版厚において、福岡よりも札幌の方が疲労度が大きくなる傾向を示している。これは、5.5.2 においても示したように、最大温度応力について札幌の方が福岡よりも大きいためである。このように、疲労度についても、気温が低かったとしても、版上下面温度差および版内温度分布によっては、必ずしも疲労度が小さくなるわけではないことを示している。

図 5-29 から、疲労度が 1.0 となる版厚は福岡で 470mm, 札幌で 490mm と 20mm 程度の差異があり、特に気温の低い札幌の方が版厚が厚くなる。このように、コンクリート舗装版が位置する地域の気象条件により、版厚に有意な差があることが確認された。

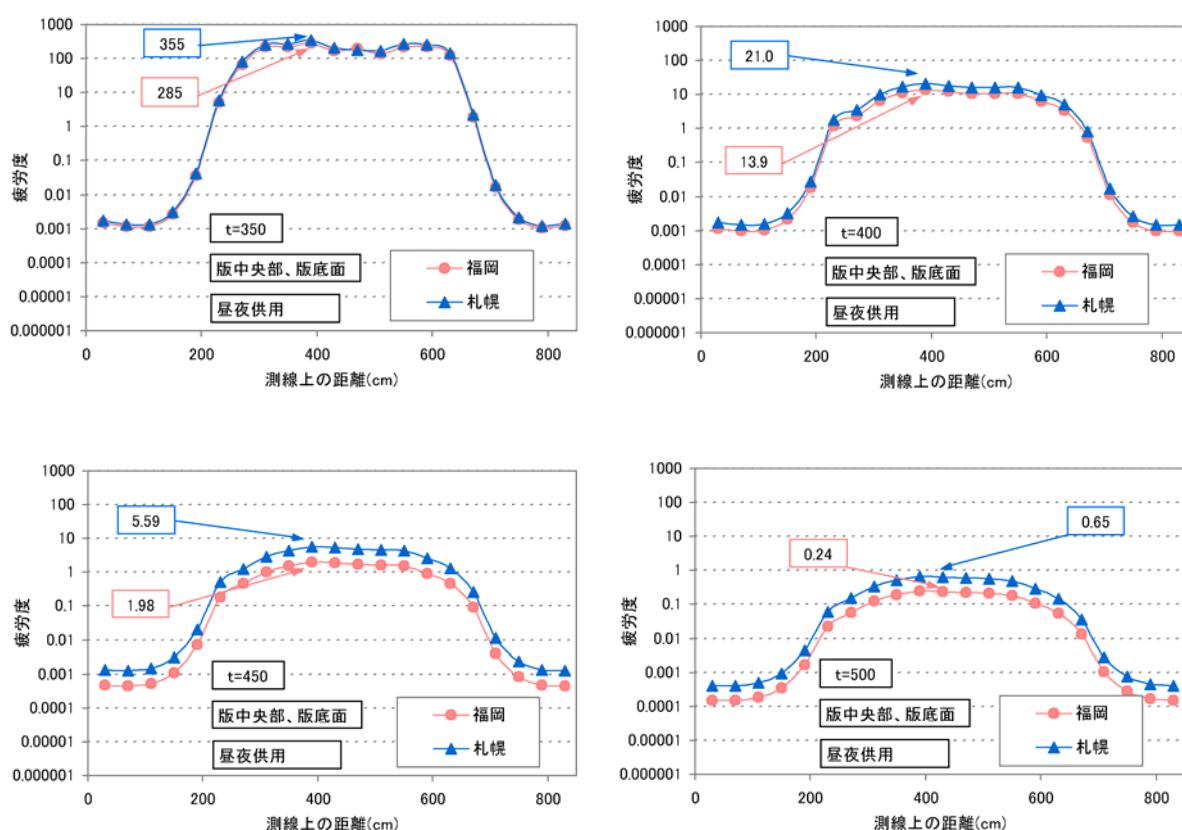


図 5-28 疲労度算定結果

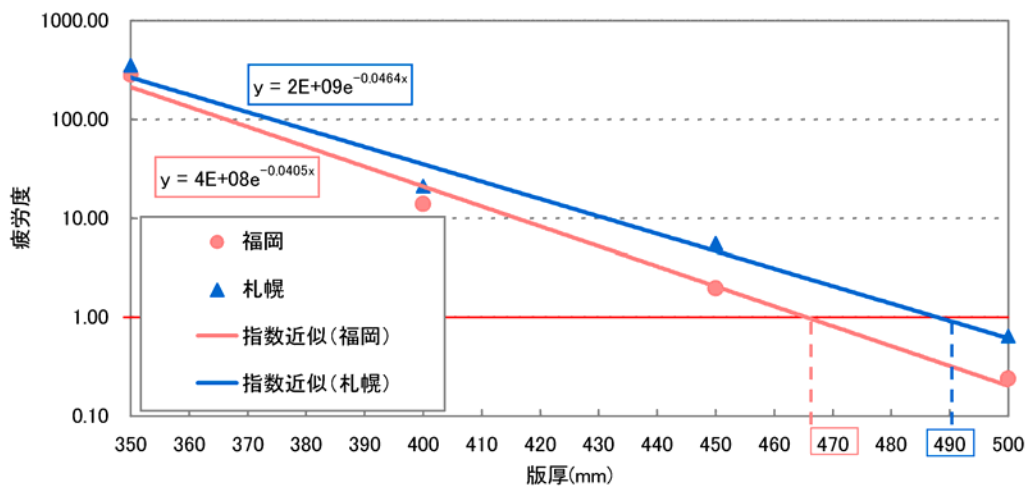


図 5-29 疲労度と版厚の関係

5.6. おわりに

本章では，3章および4章で述べた熱伝導解析・3DFEMにより，版厚・気象条件を考慮して理論的に算定した温度応力を用いて温度応力の発生頻度を整理し，その頻度分布を用いて疲労度を算定した．その結果，以下のことが確認された．

- 5.2 および 5.3 において示したように，熱伝導解析・3DFEMにより温度応力を算定することで，版厚・気象条件を考慮した温度応力の発生頻度を直接算定することを可能とした．この手法により，従来手法よりも精度良く温度応力の発生頻度を求めることができる．
- 5.3.3 に示したように，版厚が厚くなるほど，最大温度応力も小さくなるため高引張応力域における温度応力の発生頻度は少なくなる一方で，低引張応力域における発生頻度は多くなる．そのため，この温度応力の発生頻度の傾向が，疲労度に対して影響を及ぼすことを推測したが，5.4.4 に示したように，疲労度は版厚が厚くなるほど小さくなる傾向を示している．したがって，上記のような版厚に比例した低引張応力域における温度応力の発生頻度の増加が疲労度に及ぼす影響は小さい．つまり，疲労度に対しては，高引張応力域の温度応力の影響が支配的であることが確認された．
- 5.3.4 に示したように，コンクリート舗装版底面における温度応力は，7時～22時の日中に引張応力の殆どが発生し，23時～6時の夜間には圧縮応力の発生が支配的であることが確認された．つまり，夜間に航空機交通量が増大し航空機荷重応力が生じたとしても，そのときに生じる温度応力は圧縮応力となる頻度が多いことを示している．したがって，5.4.4 に示したように，夜間に航空機交通量が増大したとしても，疲労度に対しては影響を及ぼさないことが明らかとなった．
- 5.3.4 に示したように，コンクリート舗装版表面における温度応力は，特に 23時～6時の夜間

において、引張応力となる頻度が多いことが確認された。そのため、夜間に航空機交通量が増大した場合、疲労度が大きくなることが推測された。しかし、5.4.4 に示したように、版表面において航空機荷重により生じる応力自体が小さいため、疲労度は版底面と比較して極端に小さい。このことから、版表面については疲労度がクリティカルとはならないことが明らかとなった。

- ・5.4.4 に示したように、今回の設計条件においては、版縁部よりも版中央部の方が疲労度が大きくなることが確認された。

・5.4.5 において示したように、版厚が薄い場合（300mm 程度）は、3DFEM により算定された温度応力を用いた疲労度は、岩間の提案式によるものと同程度の値を示すが、それ以上になると岩間の提案式では過大に評価することとなる。一方で、版厚が厚い場合（500mm 程度）は、3DFEM により算定された温度応力を用いた疲労度は、坪川の提案式によるものと同程度の値を示すが、それ以下になると坪川の提案式では過小に評価することとなることが確認された。

- ・5.4.5 において示したように、簡易的に表現した疲労度と版厚の関係から、疲労度が 1.0 となる版厚は、岩間の提案式による温度応力を用いた場合は 470mm に対して、3DFEM による今回提案手法で算定した温度応力を用いた場合は 430mm となることが確認された。今回の設計条件の下では、このように版厚を 40mm 低減でき、今回提案手法による疲労度設計の合理性が確認された。

- ・5.5 において示したように、国内の気象条件の異なる 2 地点において、今回提案手法による試設計を行った結果、版厚に有意な差があった。特に気温の低い札幌の方が福岡よりも必要版厚が厚くなることが確認された。従来の手法では、このような気象条件の差異を精密に反映させることはできない。このように、今回の提案手法は合理的な舗装設計を行ううえで、有用であることが確認された。

以上のように、本章では熱伝導解析・3DFEM により算定した温度応力を用いた疲労度について詳細に検討を行った。その結果、今回提案手法の合理性・有用性を確認できたとともに、空港コンクリート舗装の疲労度に対しての版厚・版内位置・時間帯等の種々の条件が及ぼす影響を明確にすることができた。

参考文献

- [1] (財) 港湾空港建設技術サービスセンター：空港舗装構造設計要領，平成 11 年 4 月
- [2] (社) 日本道路協会：舗装設計便覧，2006
- [3] (社) 日本道路協会：舗装設計施工指針，2006
- [4] (財) 港湾空港建設技術サービスセンター：空港舗装設計要領及び設計例，平成 20 年 7 月
- [5] 高橋真一，坪川将丈，水上純一，斎藤泰：空港舗装における理論的設計法パラメータの感度分析，国土技術政策総合研究所資料，No.633，2011
- [6] 竹内康，小梁川雅，松井邦人：気象観測データを用いたコンクリート舗装版上下面温度差の試算，土木学会第 60 回年次学術講演会，5-104，pp.207-208，平成 17 年 9 月
- [7] 坪川将丈，水上純一，斎藤泰：空港コンクリート舗装の版上下面温度差頻度分布に関する考察，土木学会第 65 回年次学術講演会，V-036，pp.71-72，平成 22 年 9 月
- [8] 八谷好高：空港コンクリート舗装のマネジメントシステムに関する研究，港湾技研資料 No.698，1991.2
- [9] 小梁川雅，野田悦郎，伊藤正秀：供用履歴を受けたコンクリート舗装の疲労特性に関する研究，土木学会舗装工学論文集，第 9 巻，pp.149-156，2004
- [10] 宮田俊介，丸山暉彦，中村健：信頼性を考慮した舗装設計法に関する研究，土木学会第 57 回年次学術講演会，pp.873-874，2002
- [11] 竹内康，小梁川雅，西澤辰男，木村慎：路盤の経年変化がコンクリート舗装の疲労破壊に及ぼす影響，舗装工学論文集，土木学会，Vol.3，pp.93-100，1998
- [12] Westergaard, H.M. : Computation of Stresses in Concrete Roads, Proc of HRB, Vol.5, pp.90-112, 1925
- [13] Hogg, A.H.A : Equilibrium of a Thin Plate, Symmetrically Loaded, Resting on a Elastic Foundation of Infinite Depth, Philosophical Magazine, Series7, Vol.25, pp.576-582, 1938
- [14] Pickett, G. and G.K.Ray: Influence Charts for Concrete Pavements, Trans. of ASCE, Vol.116, pp.49-73, 1951
- [15] 西澤辰男，松野三朗：コンクリート舗装の構造解析における有限要素法の適用性について，土木学会論文報告集，第 338 号，pp.207-215，1983
- [16] 西澤辰男：3 次元 FEM に基づいたコンクリート舗装構造解析パッケージの開発，土木学会舗装工学論文集，第 5 巻，pp.112-121，2000
- [17] 福田裕子，江川和寿，松井邦人：舗装温度予測システム開発のための顕熱モデルの検討，土木学会舗装工学論文集，第 14 巻，pp.49-56，2009

6. 結論

空港コンクリート舗装の設計において、近年では航空機の大型化や航空機交通量の増加に伴い、現行の設計法では考慮されていなかった大型航空機による荷重や多頻度の交通量を設計条件として考慮する必要が生じてきた。このようなことから、空港コンクリート舗装設計について、従来中心であった経験的設計手法から移行し、理論的設計手法である疲労度設計による版厚の算定が実施されつつある。

疲労度設計手法では、航空機荷重により発生する荷重応力と、気象作用により生じる温度応力を考慮する。特に、温度応力については航空機荷重により生じる応力と同程度であるため疲労度に与える影響は大きく、その評価が非常に重要になる。ここで、温度応力については、従来岩間の提案式が一般的に用いられてきた。この式は版厚 20～25cm のコンクリート舗装版に対する長期計測結果から導出された実験式である。しかし、版厚が異なる場合はコンクリート舗装版の温度分布および温度応力も大きく異なり、特に版厚の厚い空港コンクリート舗装では岩間の提案式で算定された温度応力よりも小さく評価できることが指摘されている。これに対して、坪川は版厚 42cm のコンクリート舗装版に対する長期計測結果から、版厚の影響を考慮したコンクリート舗装版の温度応力算定式を提案している。しかし、両式ともある版厚・ある地域の気象条件におけるコンクリート舗装版に対する計測結果に基づいた実験式であり、様々な版厚・気象条件に対して、温度応力を適切に評価できる手法かどうかは不明である。特に、実験式であるため、版厚・気象条件により刻々と変化する版内温度分布を適切に考慮した温度応力の算定方法とは言い難い。

また、疲労度設計においては、ある値をもった温度応力がどの程度の頻度で生じるか、つまり温度応力の発生頻度を算定する必要がある。上記で述べた従来の提案式では版上下面温度差より温度応力を算定するが、その際に版上下面温度差の発生頻度を用いて温度応力の発生頻度を求めることとなる。ここで、その版上下面温度差の発生頻度については、現行の指針では、一例として版厚15～30cmまでの6パターンのコンクリート版に対する「温度差の大きい地域」と「温度差の小さい地域」の2地域の発生頻度を示しているのみであり、様々な版厚・気象条件に対応したものではない。コンクリート舗装版の版厚、および位置する地域の気象条件により版上下面温度差発生頻度は大きく異なり、その差異が疲労度に及ぼす影響は大きい。

このように、コンクリート舗装版の温度分布や温度応力、およびその発生頻度に対して、版厚・気象条件が及ぼす影響やその挙動を詳細に検討した研究は行われておらず、明確でない点が多いのが実状である。また、温度応力に対する解析的なアプローチも殆ど行われていなかった。

以上の背景から、本論文ではコンクリート舗装版の温度分布・温度応力に対して、熱伝導解析お

および 3DFEM による解析的なアプローチを行った。その結果から、コンクリート舗装版の温度分布・温度応力に対する詳細な検証、様々な版厚・気象条件に適用できる温度応力の評価手法の確立を行った。また、その温度応力を用いた疲労度設計手法の合理化の一提案を行い、試設計を行うことで、その有用性についても検証を実施した。本論文における結論と今後の課題を以下に整理する。

2 章では、実際にコンクリート舗装版に生じる温度応力について検証するため、厚さ 46cm の実大規模のコンクリート舗装版に対して、1 年間に渡り実施したひずみ・温度計測データから算定された温度応力についてその挙動を整理した。また、その温度応力と現状の提案式から算定された温度応力を比較することにより、現状の提案式の問題点を確認・抽出した。その結果、以下のことが確認された。

- ・ 高強度コンクリートおよび普通コンクリートの 2 種類の配合の異なるコンクリート舗装版の計測結果から、舗装版内の温度・ひずみ、およびそれらから算定される温度応力について、コンクリートの配合の違いによる差異はないことが確認された。したがって、コンクリート舗装版の温度応力を算定する際には、コンクリートの配合の影響を考慮しなくてもよいことが明らかとなった。
- ・ コンクリート舗装版の長期計測結果から整理された版上下面温度差発生頻度は、現行の手法において示されているものとは異なることが確認された。したがって、対象とするコンクリート舗装版の版厚・気象条件を考慮したコンクリート舗装版温度を算定することが合理的な舗装設計を行ううえで必要であることが示された。
- ・ コンクリート舗装版の長期計測結果から算定された温度応力の挙動について、既往の研究において指摘されてきたとおり、曲げ拘束応力と内部拘束応力の位相差は存在し、曲げ拘束応力が卓越する温度上昇期には、内部拘束応力は圧縮応力として作用するため、曲げ拘束応力と内部拘束応力の足し合わせとして表現される温度応力は曲げ拘束応力よりも小さくなることが確認された。
- ・ コンクリート舗装版の長期計測結果から算定された最大温度応力は、岩間の式に対しては 50% 程度小さい値を示し、坪川の提案式に対してはほぼ同程度の値となることが確認された。
- ・ コンクリート舗装版の長期計測結果から算定された温度応力結果から、コンクリート舗装版が曝される気象条件によりその温度分布特性が異なるため、最大温度応力のみに着目して導出した岩間の提案式・坪川の提案式における曲げ拘束応力に対する内部拘束応力の低減割合についても、差異が生じることが確認された。
- ・ 上記より、合理的なコンクリート舗装設計を行ううえで、対象とするコンクリート舗装版の気象条件を考慮したコンクリート舗装版温度分布、およびそれを反映した温度応力の評価の必要性が確認された。

3 章では、コンクリート舗装版の温度分布について、熱伝導解析により理論的に算定する手法の提案を行い、コンクリート舗装版の温度分布特性について検証を行った。その結果、以下のことが確認された。

- ・ コンクリート舗装版の長期計測結果における温度分布に対して、熱伝導解析により算定されたコンクリート舗装版の温度分布は有意な差異は無く、熱伝導解析による温度分布の算定手法の妥当性が確認された。
- ・ 熱伝導解析より算定されたコンクリート舗装版の温度分布特性について、版厚に比例して非線形性が大きくなることが確認された。特に版厚 400mm 以上では、版上下面温度差が同一であるにも関わらず非線形性が大きくなる傾向にある。このことから、版厚 400mm 以上では、曲げ拘束応力に対する内部拘束応力の低減がより顕著になると考えられる。
- ・ 熱伝導解析より算定されたコンクリート舗装版の温度分布特性について、季節毎の変動のみならず日変動といった気象条件によっても、温度分布の非線形性は大きく異なることが確認された。これは、温度分布の非線形性により生じる内部拘束応力の曲げ拘束応力への低減度合が、気象条件によって異なることを示している。
- ・ 熱伝導解析より算定されたコンクリート舗装版の温度分布について、版厚 400mm 以上では版内温度分布は殆ど変化しないことが確認された。このことから、版厚 400mm 以上では同様の版内温度分布を用いることができると考えられる。
- ・ 熱伝導解析結果よりコンクリート舗装版の温度分布は 2 次近似曲線化が可能であることが確認された。
- ・ 本研究により、熱伝導解析による温度分布の算定手法を確立できたとともに、版内温度分布特性についての詳細な検証結果から、その有用性が確認された。

4 章では、熱伝導解析により得られたコンクリート舗装版内の温度分布を入力し、3DFEM により理論的に温度応力を算定する手法の提案を行い、コンクリート舗装版の温度応力についての検証を行った。その結果、以下のことが確認された。

- ・ 拘束ひずみ・温度応力について長期計測結果から算定されたものと、3DFEM により算定されたものを比較した結果、拘束ひずみについては一致することが確認された。温度応力については、温度分布・計測値から算定する際の精度等に起因する誤差はあるものの、全体としての挙動はよく一致していた。これらから、3DFEM による温度応力の算定手法の適用性が確認された。
- ・ 熱伝導解析から算定された温度分布と、その温度分布を用いて 3DFEM により算定した温度応力を比較した結果、版上下面温度差が同一であっても、温度分布の非線形性が異なれば、温度応力は大きく異なることが確認された。このことから、従来の岩間の提案式・坪川の提案式のように、版上下面温度差の 1 次式として温度応力を算定するのではなく、温度分布を適切に考慮できる 3DFEM による温度応力の算定手法の有用性が示された。

- 3DFEM により算定された温度応力について、版表面・版底面ともに、版中央部の方が版縁部よりも温度応力はわずかに大きく、版中央部から版縁部にかけて温度応力は減少していく傾向を示すことが確認できた。このように、3DFEM により温度応力を算定することで、版内平面位置が及ぼす温度応力の影響を詳細に表現できることが示された。
- 3DFEM により算定された温度応力について、版厚が厚くなることで温度応力の最大値自体は小さくなるが、この傾向は外気温が大きいほど顕著であり、版厚が温度応力に及ぼす影響の大きさは気象条件にも依存することが確認された。これは、岩間の提案式・坪川の提案式のように、計測結果から算定された日温度応力の最大値のみから、温度応力を推定した場合には表現できない挙動である。
- 3DFEM により算定された温度応力と従来の提案式により算定された温度応力の比較検討を行った。その結果、版厚が薄い場合（300mm 程度）は、3DFEM により算定された温度応力の最大値は、岩間の提案式によるものと同程度の値を示すが、それ以上になると岩間の提案式では過大に評価することとなることが確認された。一方で、版厚が厚い場合（500mm 程度）は、3DFEM により算定された温度応力の最大値は、坪川の提案式によるものと同程度の値を示すが、それ以下になると坪川の提案式では過小に評価することとなることが確認された。
- 本研究により、3DFEM による温度応力の算定手法を確立できた。さらに、温度応力についての詳細な検証、および従来の温度応力の提案式との比較を行うことで、3DFEM の有用性が示された。

5 章では、熱伝導解析・3DFEM により、版厚・気象条件を考慮して理論的に算定した温度応力を用いて温度応力の発生頻度を整理し、その頻度分布を用いた疲労度設計手法の合理化の一提案を行った。さらに、気象条件の異なる国内の 2 地点に対する試設計を行い、提案手法の有用性の確認を試みた。その結果、以下のことが確認された。

- 熱伝導解析・3DFEM により温度応力を算定することで、版厚・気象条件を考慮した温度応力の発生頻度を直接算定することを可能とした。この手法により、従来手法よりも精度良く温度応力の発生頻度を求めることができる。
- 版厚が厚くなるほど、最大温度応力も小さくなるため高引張応力域における温度応力の発生頻度は少なくなる一方で、低引張応力域における発生頻度は多くなる。そのため、この低引張応力域における温度応力の発生頻度の傾向が、疲労度に対して影響を及ぼすことを推測したが、疲労度は版厚が厚くなるほど小さくなる傾向を示している。したがって、上記のような版厚に比例した低引張応力域における温度応力の発生頻度の増加が疲労度に及ぼす影響は小さい。つまり、疲労度に対しては、高引張応力域の温度応力の影響が支配的であることが確認された。
- 温度応力の頻度分布について、コンクリート舗装版底面における温度応力は、7 時～22 時の日中に引張応力の殆どが発生し、23 時～6 時の夜間には圧縮応力の発生が支配的であることが確

認められた。つまり、夜間に航空機交通量が増大し航空機荷重応力が生じたとしても、そのときに生じる温度応力は圧縮応力となる頻度が多いことを示している。したがって、疲労度の算定結果からも分かるように、夜間に航空機交通量が増大したとしても、疲労度に対しては影響を及ぼさないことが明らかとなった。

- 温度応力の頻度分布について、コンクリート舗装版表面における温度応力は、特に 23 時～6 時の夜間において、引張応力となる頻度が多いことが確認された。そのため、夜間に航空機交通量が増大した場合、疲労度が大きくなることが推測された。しかし、疲労度の算定結果からも分かるように、版表面において航空機荷重により生じる応力自体が小さいため、疲労度は版底面と比較して極端に小さい。このことから、版表面については疲労度がクリティカルとはならないことが明らかとなった。
- 疲労度算定結果より、今回の設計条件においては、版縁部よりも版中央部の方が疲労度が大きくなることが確認された。
- 疲労度算定結果について、3DFEM により算定された温度応力と従来の提案式により算定された温度応力を用いた場合の比較検討を実施した。版厚が薄い場合（300mm 程度）は、3DFEM により算定された温度応力を用いた疲労度は、岩間の提案式によるものと同程度の値を示すが、それ以上になると岩間の提案式では過大に評価することとなる。一方で、版厚が厚い場合（500mm 程度）は、3DFEM により算定された温度応力を用いた疲労度は、坪川の提案式によるものと同程度の値を示すが、それ以下になると坪川の提案式では過小に評価することとなることが確認された。
- 疲労度算定結果から簡易的に算定した版厚について、3DFEM により算定された温度応力と従来の提案式により算定された温度応力を用いた場合の比較検討を実施した。疲労度が 1.0 となる版厚は、岩間の提案式による温度応力を用いた場合は 470mm に対して、3DFEM による今回提案手法で算定した温度応力を用いた場合は 430mm となることが確認された。今回の設計条件の基では、このように版厚を 40mm 低減でき、今回提案手法による疲労度設計の合理性が確認された。
- 国内の気象条件の異なる 2 地点において、今回提案手法による試設計を行った結果、版厚に有意な差があった。特に気温の低い札幌の方が福岡よりも必要版厚が厚くなることが確認された。従来の手法では、このような気象条件の差異を精密に反映させることはできない。このように、今回の提案手法は合理的な舗装設計を行ううえで、有用であることが確認された。
- 本研究により、合理的なコンクリート舗装版の疲労度設計手法を提案できたとともに、その有用性も示された。さらに、空港コンクリート舗装の疲労度に対しての版厚・版内位置・時間帯等の種々の条件が及ぼす影響を明確にすることが可能となった。

以上のように、本研究では、空港コンクリート舗装版の版厚・気象条件を考慮した汎用的な解析手法として、熱伝導解析モデル・3DFEM モデルを組み合わせた理論的解析手法による温度分布・温度応力の評価手法を確立した。さらに、これらのモデルに基づいた汎用的な疲労度設計手法の一提案を行うことができた。また、これらの結果を基に、空港コンクリート舗装版の温度分布、温度応力、および疲労度の挙動について、より詳細に検証を行い、新たな知見を得ることができた。

本研究における提案手法を用いることで、従来の岩間の提案式による温度応力を用いた場合と比較して版厚を低減することが可能となり、コスト縮減につながる。特に空港コンクリート舗装が用いられるエリアは広大であり、版厚を少しでも低減することはコスト縮減に対するインパクトが非常に大きいと考えられる。また、従来の手法では適切に考慮されていなかった、または不明確であった事象についても、この提案手法では適切に考慮することが可能となり、コンクリート舗装設計に対する信頼性を向上させることができた。

このように、本研究で提案した手法は十分に実用性を有するものであると考えるが、今後いくつかの課題が残されている。まず熱伝導解析については、舗装表面の境界条件が版内温度分布に与える影響は大きい。本研究では、舗装表面の境界条件として計測表面温度を入力し算定した温度分布を主として用いており、その精度は高いことは確認された。しかし、より汎用的な手法としては、

「5.5. 今回提案手法による試設計」において示したような舗装表面を熱伝達境界として温度分布を算定するのが望ましい。舗装表面を熱伝達境界とする場合、AMeDAS データ等から得られる気温・湿度・日射量・風速のパラメータを用いて、コンクリート舗装版の温度分布を算定することができるが、その精度についてはより詳細な検証を行う必要があると考えられる。また、検証を行うための様々な地域での計測データの蓄積を行うことも今後求められる。

3DFEM による温度応力解析については、その解析に多大な時間を要するといった問題がある。本研究では、代表的な版厚に対して温度応力解析を実施し、疲労度と版厚の関係を簡易的に表現して、疲労度が 1.0 となる版厚を求めた。より精度の高いものとするためには、代表的な版厚ではなく各版厚の温度応力を各々算定するのが理想的であるが、その場合の温度応力解析に要する時間は膨大なものとなる。したがって、3DFEM を改良し解析時間を短くすること、または今回の解析結果を基に温度応力の簡易式を提案することが、実務で今回の手法を適用していくうえで望まれる。

最後に、本研究で提案したコンクリート舗装版の疲労度設計手法が、今後も継続的に拡張され、様々な研究成果が得られることにより、空港コンクリート舗装設計の合理化の一助となることを期待する。

謝辞

まず、本論文をとりまとめるにあたり御指導を頂きました、京都大学・河野広隆教授、同・宮川豊章教授、同・大津宏康教授に深謝の意を表します。

本研究は、東京国際空港国際線地区エプロン等整備等事業に筆者が携わったことがきっかけとなっております。コンクリート舗装の温度応力は、本論文でも触れているように、複雑な挙動を示す現象であり、検討をすればするほど新たな疑問が生じるといったことを繰り返していたように思います。このような困難な課題に対して、論文としてまとめる際には苦労もあり、筆者には手に余る部分が多々ありました。

そのような中で、京都大学・河野広隆教授には、終始的確なご助言を頂くとともに、懇切丁寧な御指導を賜りました。沢山の御教示を頂いたことにより、筆者の研究の方向性を定めることができました。御多忙にも関わらず、何度もお時間を割いて頂き御指導下さいましたこと、深く感謝しております。また、研究だけではない教授の広範な知識に感銘を受けたとともに、様々なことをお教え頂きました。教授の御指導と励ましの言葉がなければ、本論文を書き上げることは不可能でした。改めて御礼申し上げます。

京都大学・服部篤史准教授には、数多くの御助言を頂いたとともに、筆者の学生生活の御指導を賜りました。京都大学・石川敏之助教には、熱心な研究姿勢に感銘を受けるとともに、多岐にわたる御指導を頂きました。厚く御礼申し上げます。

石川工業高等専門学校・西澤辰男教授には、本研究を始めるきっかけを与えて頂きました。また、コンクリート舗装に関する幅広い知識を御教示頂いたとともに、本研究の方向性についてのご助言頂きました。挫折しそうになった筆者に、励ましの言葉と適切なご意見を頂き、改めて教授の御人望を感じたことを覚えております。ここに、深く感謝いたします。

東京電機大学・松井邦人教授には、温度分布の解析にあたって、これまでの幅広い経験から適切な御助言を頂くとともに、筆者の取り止めのない質問に対しても丁寧に御指導頂きました。厚く御礼申し上げます。

国土技術政策総合研究所・坪川将丈氏には、コンクリート舗装の温度応力について、浅学な筆者の質問に対しても懇切丁寧に御指導を頂きました。論文のとりまとめに関しても適切な御助言ならびに御指導を頂きましたこと、心より感謝いたします。

前述したように、本研究は東京国際空港国際線地区エプロン等整備等事業に筆者が携わったことがきっかけとなっております。安間清副総括(羽田空港国際線エプロン PFI 株式会社)、土方遍作業所長(大成建設株式会社東京支店羽田 PFI 作業所)には、多大な御理解と御支援を賜りました。御協力なくしては、本研究の遂行は成し得なかったと思います。ここに、感謝いたします。林伸行土木設計部長(大成建設株式会社)、坪根康雄土木設計技師長(大成建設株式会社)には、若輩であるにも関わらず研究を進めていきたいという筆者の思いを汲んで頂き、また数々の御支援を頂きまし

た。常に筆者を見守って頂き、ご指導頂きましたこと、深く感謝いたします。加賀田健司関西支店統括営業部長（大成建設株式会社）、大前博関西支店土木部部長（大成建設株式会社）には、多岐にわたる御指導を頂き、ご支援下さいましたこと、心より感謝いたします。丸屋剛室長（大成建設株式会社）には、浅学な筆者の質問に対して、懇切丁寧な御指導を頂きましたこと、深く感謝いたします。服部佳文室長（大成建設株式会社）には、多大な御理解と御支援を賜り、暖かく見守って頂きました。深く感謝いたします。下村泰造課長（大成建設株式会社）には、筆者が大成建設株式会社に入社したときから上司として御指導頂いていたとともに、本研究を始めるきっかけを与えて頂きました。挫折しそうになったとき、進むべき方向が分からず逡巡しているときに、叱咤激励とともに明確な御助言を頂き、筆者を奮い立たせて頂いたこと、心より感謝しております。

京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻構造マネジメント工学研究室の皆様には、本研究を遂行していくうえで、多大なる御支援を頂きました。修士課程・松島央樹氏には、コンクリート舗装の温度応力挙動について共に研究に取り組み、本研究の遂行に多大なる貢献を頂きました。深く感謝いたします。秘書の稲田紀子氏には、学生生活における様々な面で御支援頂きました。本当に有り難うございました。

多くの方々の御支援・御指導により、挫けそうになる心を奮い立たせ、本論文を完成させることができました。このように多くの方々から御指導頂いたことは、今後の筆者の人生にとって、大きな財産となりました。このことを胸に刻み、これから社会への大きな貢献を果たすことができるよう精進していきたいと考えております。最後に陰で支えてくれた妻、そして家族に心より感謝いたします。

尾関 孝人